



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Cálculo de propiedades del aire y gases de combustión a baja presión

Autor

Héctor Joaquín Ochoa Barrau

Director

Mariano Muñoz Rodríguez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2016



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Héctor Ochoa Barrau,

con nº de DNI 77215338Z en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado en ingeniería de tecnologías industriales, (Título del Trabajo)
Cálculo de propiedades del aire y gases de combustión a baja presión

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 22 de septiembre de 2016

Fdp:

Héctor

Resumen

Cálculo de propiedades del aire y gases de combustión a baja presión

El conocimiento de las propiedades de los gases producto de la combustión es de gran importancia en el ámbito de la ingeniería térmica. Estas propiedades permiten definir el estado termodinámico de dicha mezcla de gases, lo cual es fundamental para conseguir un diseño y funcionamiento óptimo en motores y turbomáquinas térmicas.

Para este propósito se ha llevado a cabo el presente proyecto, en el que se aplican conocimientos matemáticos, termodinámicos e informáticos. La finalidad es desarrollar un programa informático, que permita obtener propiedades de aire y gases de combustión. Este cálculo se puede realizar a partir del conocimiento de una cualquiera de las propiedades, con la cual se puede obtener el resto de las mismas. Es posible realizar estos cálculos para diversos combustibles, y diferente dosificación durante la combustión.

Inicialmente se comienza con una búsqueda bibliográfica, con el objetivo de encontrar métodos que permitan calcular las propiedades. Estos métodos definen principalmente constantes características asociadas a los productos de combustión en función del combustible. A continuación se lleva a cabo la definición y el desarrollo matemático de las ecuaciones termodinámicas requeridas para calcular las propiedades deseadas, y posteriormente, se aplican los métodos encontrados con dichas ecuaciones para la obtención de las propiedades de los gases producto de la combustión.

Por último, se implementan los métodos y las ecuaciones en un programa informático, en este caso se utiliza el software de programación *Visual Basic Studio 2010*. La concepción de este programa informático se ha basado en que su utilización sea sencilla, rápida y ágil.

Índice general

1. Memoria	9
1.1. Introducción: Proceso de la combustión	10
1.1.1. Combustible	11
1.1.2. Comburente	12
1.1.3. Productos de la combustión	12
1.1.4. Dosado	13
1.2. Definición de propiedades	15
1.2.1. Temperatura	15
1.2.2. Calores específicos	15
1.2.3. Entalpía	16
1.2.4. Entropía	16
1.2.5. Presión y presión relativa	17
1.2.6. Velocidad del sonido	17
1.3. Descripción de métodos	18

1.3.1. Primer método	18
1.3.2. Segundo método	20
1.4. Ejemplos del programa	24
1.5. Comparación de métodos	26
1.6. Conclusiones	29
A. Anexo A	33
A.1. Desarrollo de ecuaciones	33
A.1.1. Gas ideal	33
A.1.2. Mezcla de gases	37
B. Anexo B	39

Nomenclatura

C_p	—	Calor específico a presión constante
C_v	—	Calor específico a volumen constante
γ	—	Relación de calores específicos
n_C	—	Número de átomos de Carbono en una molécula de combustible
n_H	—	Número de átomos de Hidrógeno en una molécula de combustible
n_O	—	Número de átomos de Oxígeno en una molécula de combustible
$m_{combust}$	—	Masa de combustible
m_{air}	—	Masa de aire
$n_{combust}$	—	Moles de combustible
n_{air}	—	Moles de aire
$M_{combust}$	—	Peso molecular del combustible
M_{air}	—	Peso molecular del aire
f	—	Dosado
f_{est}	—	Dosado estequiométrico
f_{rel}	—	Dosado relativo
T	—	Temperatura
h	—	Entalpía
ϕ	—	entropía específica
s	—	Entropía
P	—	Presión
P_r	—	Presión relativa
R_u	—	Constante universal de los gases
R	—	Constante característica para cada gas
a	—	Velocidad del sonido en el gas
A_i	—	Constantes para el calor específico a presión constante, primer método y aire
y_i	—	Fracción másica del componente i
\mathfrak{S}_i	—	Constantes para el calor específico a presión constante en función del combustible, segundo método
\mathfrak{R}	—	Variable para la constante característica en función del combustible, segundo método
v	—	Volumen específico
ρ	—	Densidad
u	—	Energía interna

Memoria

Objetivo

Este trabajo de fin de grado se centra en el cálculo de propiedades de productos de la combustión, procedentes de combustibles ampliamente utilizados en el sector industrial, en turbinas de gas y en motores alternativos de combustión interna.

El principal objetivo de este proyecto es desarrollar una herramienta informática que se pueda aplicar tanto a labores docentes, en las que destacaría su uso en la obtención de soluciones al resolver problemas, como en el ámbito de la investigación y diseño de motores y turbomáquinas térmicas. Se ha buscado que las propiedades deseadas se puedan obtener de manera sencilla, sin emplear mucho tiempo, y que mediante el conocimiento de una cualquiera de estas propiedades se pueda obtener el resto. Para ello se ha implementado un programa informático, en el que cobra gran importancia la interfaz, a fin de poder permitir una interacción fácil y fluida con el usuario.

Motivación

Los combustibles fósiles: el petróleo, el carbón y el gas natural mediante su combustión representan sin duda la principal fuente de consumo energético en el mundo, muy por delante de la energía nuclear, hidroeléctrica y renovables. Este consumo representa el 81.2 % del consumo global de energía, según datos del banco mundial (2013)[7].

Además, Los combustibles fósiles también son mayoritariamente utilizados en el sector del transporte; en automoción se usa gasolina y diésel, en motores de encendido provocado y motores de encendido por compresión respectivamente, destacar también en la misma aplicación el uso de alcoholes como combustible en países como Brasil; en turbinas de gas para propulsión aérea se emplea queroseno, debido a su bajo punto de congelación que evita que el combustible

se congele a grandes alturas. En el sector de la producción de energía se puede nombrar las centrales termoeléctricas, como la de Andorra que funciona con carbón, o las centrales de ciclo combinado que suelen usar como combustible gas natural.

Esto da una idea del interés que tiene el conocimiento preciso del proceso de combustión de los combustibles fósiles en el ámbito científico e ingenieril. En este aspecto, el objetivo de este trabajo de determinar las propiedades de los gases productos de la combustión juega un gran papel. Conocer las propiedades permite definir el estado termodinámico de dicha mezcla de gases, lo que es de gran importancia a la hora de diseñar y optimizar los equipos que usan la combustión como medio de producción de potencia. Algunos ejemplos en los que el conocimiento de las propiedades de los gases son clave pueden ser, la caracterización del flujo compresible en turbinas de gas aéreas, o el diseño de la geometría del dispositivo de escape de un motor alternativo de combustión interna en automoción.

Metodología

Para llevar a cabo el objetivo de este proyecto se comienza con una búsqueda bibliográfica sobre diferentes métodos de cálculo de propiedades de gases de combustión, que estén descritos para varios combustibles. Es de interés encontrar diferentes métodos para poder realizar al final una comparación entre los distintos resultados que arrojan cada uno.

A continuación se realiza un estudio en profundidad de los métodos encontrados para su comprensión y su posterior aplicación en los cálculos (los métodos están adecuadamente descritos en el apartado 1.3). Así como el planteamiento y definición de las ecuaciones necesarias para el cálculo de las propiedades, las cuales están desarrolladas en el anexo A.1.1.

Por último, se hace uso del software de programación *Visual Basic Studio 2010*, para la creación de un programa que implemente los métodos y ecuaciones anteriormente mencionados, en el cual se calculen las propiedades de los gases de combustión en función del combustible, de la relación aire-combustible de la mezcla de gases y la temperatura o una propiedad dependiente de la misma. Es importante que la interfaz de este programa sea clara y sencilla para que el usuario pueda obtener resultados de forma rápida.

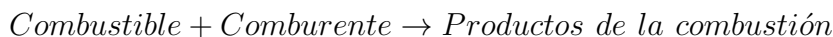
1.1. Introducción: Proceso de la combustión

Previo a centrarse en las propiedades de los gases producto de la combustión, se va a hablar del origen de esta mezcla de gases: el proceso de la combustión. A continuación se define el propio proceso, los elementos que participan en él, y un parámetro característico como es la relación másica combustible-aire (dosado).

La combustión es un conjunto de procesos físico-químicos durante la cual se libera energía

interna del combustible en forma de calor. Se da una reacción química de oxidación, la cual sucede de forma rápida y exotérmica, donde el oxígeno del aire actúa como comburente, oxidando el combustible. Esta reacción se inicia a partir del punto de ignición del combustible empleado, que es la temperatura a la cual el combustible empieza a arder de forma estable.

La reacción química que se da en la combustión, mostrada de forma sencilla, es la siguiente:



El estudio del proceso de la combustión es bastante complejo, por ello se consideran ciertas simplificaciones durante el mismo, en lo que respecta a los cálculos de los productos de la combustión:

- Se supone que la combustión es completa, es decir, que todos los elementos del combustible se oxidan durante la combustión y existe suficiente oxígeno para que suceda. Esto es necesario para considerar que los gases producto de la combustión son los que se especifican en el apartado 1.1.3, y que no se generan componentes no tenidos en cuenta, como monóxido de carbono (al no oxidarse completamente el carbono del combustible) o inquemados.
- No se tienen en cuenta los efectos de la disociación. Cuando se han formado los productos de la combustión, si permanecen a muy altas temperaturas, estos tienden a separarse térmicamente en elementos más sencillos, cambiando entonces su composición. Este efecto, como se ha comentado, solo tiene lugar a temperaturas muy elevadas, y no se tiene en cuenta debido a su complejidad a la hora de evaluarlo.

1.1.1. Combustible

En este trabajo se hace hincapié en los hidrocarburos como combustible, cuya composición consta principalmente de carbono e hidrógeno ($C_{n_C}H_{n_H}$) donde n_C y n_H hacen referencia al número de átomos de cada elemento del combustible.

Los hidrocarburos líquidos se obtienen generalmente de procesos de refinado del petróleo en las refinerías, entre los que el craqueo es el más importante. Algunos ejemplos de hidrocarburos líquidos son la gasolina, el diésel o el queroseno. Los hidrocarburos gaseosos se obtienen esencialmente de los pozos de gas natural, el cual es una mezcla de varios hidrocarburos cuyo principal componente es el metano (CH_4), también se consiguen algunos hidrocarburos gaseosos mediante procesos de destilación del petróleo en las refinerías, con el propano como ejemplo. En lo que respecta a combustibles sólidos, destaca el carbón con sus diferentes tipos.

Adicionalmente se incluyen en este proyecto el hidrógeno y los alcoholes; la fórmula química de estos últimos incluye también oxígeno: $C_{n_C}H_{n_H}O_{n_O}$. Los alcoholes se usan como combustible

en medios de transporte en algunos países, y su uso se debe a un precio más barato que los combustibles tradicionales, debido a sus peores prestaciones en comparación con los combustibles hidrocarburos, como un inferior poder calorífico en comparación con la gasolina. Destacar que en cuanto a la composición de los combustibles se desprecia el posible contenido de azufre en los mismos, esto es debido a que su porcentaje es muy bajo y por lo tanto el producto que se generaría en la combustión (Dióxido de azufre, SO_2) es despreciable en cuanto al cálculo de propiedades.

La casi totalidad de las formulas químicas usadas en este trabajo se muestran en la tabla 1.3 del apartado 1.3 que describe el segundo método. El primer método está centrado sólo en el cálculo de combustible tipo hidrocarburo general de composición $(CH_2)_n$, y sus constantes características para el cálculo de propiedades se definen en la tabla 1.2.

1.1.2. Comburente

Como comburente se usa el oxígeno contenido en el aire. Cabe destacar algunos criterios que hay que tener en cuenta:

- La composición del aire se basa sólo en Nitrógeno (N_2 , 79 %) y Oxígeno (O_2 , 21 %) base molar. Se simplifica entorno a un 1 % de otros componentes, mayoritariamente Argón que es un gas noble que no reacciona; esta aportación se incluye dentro del Nitrógeno. Destacar que por cada mol de oxígeno suministrado para que suceda la combustión hay $0.79/0.21 = 3.76$ moles de nitrógeno.
- Se supone que el nitrógeno no reacciona durante la combustión, aunque éste se encuentre a una temperatura igual a la de los productos. En la realidad, a altas temperaturas el nitrógeno puede reaccionar con el oxígeno formando óxidos de nitrógeno (NO y NO_2). Esto conlleva una simplificación significativa en la composición de los gases producto de la combustión.
- El aire suministrado para el proceso de combustión se supone seco, esto quiere decir que no posee vapor de agua, por lo que no hay que tenerlo en cuenta en la reacción.

Las constantes para el aire, que permiten el cálculo de sus propiedades están definidas también en la tabla 1.2 del apartado 1.3 y estas se usan en ambos métodos.

1.1.3. Productos de la combustión

La mezcla de gases obtenidos después de la combustión consta de dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua (H_2O), además de nitrógeno (N_2), y de oxígeno (O_2) en el caso de que la reacción no sea estequiométrica y exista aire en exceso. No se genera monóxido de carbono

(CO) debido al supuesto de combustión completa, ni dióxido de azufre (SO_2) dado que no se tiene en cuenta su contenido en el combustible, y tampoco óxidos de nitrógeno, pues el propio nitrógeno se considera inerte y no reacciona, como se ha mencionado anteriormente.

En la realidad, la proporción de los productos formados durante la combustión es tremendamente compleja de determinar, porque en una combustión real las cantidades de los productos de combustión sólo se pueden determinar mediante el análisis de los gases de combustión. Esto es debido a que dependen en gran medida de diversos factores, como mezclado y turbulencia del aire, duración de combustión o geometría de la cámara de combustión.

1.1.4. Dosado

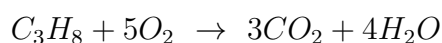
Éste es un parámetro clave en la determinación de las propiedades de los gases producto de la de combustión. El dosado es adimensional y se define como la relación másica combustible-aire de una mezcla de gases y se denota con la letra f .

$$f = \frac{m_{combust}}{m_{aire}} = \frac{n_{combust}M_{combust}}{n_{aire}M_{aire}} \quad (1.1)$$

Esta variable es muy significativa, dado que cuantifica la proporción de aire y combustible durante el proceso de combustión, lo que a su vez influye decisivamente en la composición de los productos de combustión y, por tanto, en sus propiedades. Decir que, como se aclara más adelante en los cálculos, estos no se realizan en base a cantidades netas de combustible y aire, sino que se resuelven por unidad de masa, por lo que el dosado, junto con la composición del aire y del combustible, es suficiente para establecer la composición de los gases de combustión.

Resulta oportuno disponer de un dosado de referencia, que sea útil para conocer si la combustión se realiza con mezcla rica o pobre en combustible. Para ello se utiliza el dosado estequiométrico. Este parámetro depende solamente de la composición del combustible por lo que se puede calcular de forma teórica.

A continuación se ejemplifica el cálculo del dosado estequiométrico, realizándolo para el propano (C_3H_8)¹. Para ello se debe ajustar la reacción de combustión del propano (se supone que se quema 1 mol de propano). La reacción ajustada es la siguiente:



Se necesitan 5 moles de oxígeno (O_2) para quemar completamente 1 mol de propano ($n_{combust}$). El aire pues que es necesario suministrar es: $(5 \text{ moles } O_2)/0.21 = 23.80$ moles de

¹Las formulas químicas de cada combustible se encuentran en la tabla 1.3 de apartado 1.3

aire (n_{aire}). El nitrógeno no se tiene en cuenta dado que permanece inalterable en la reacción, como ya se ha comentado en apartados anteriores. Por lo tanto, el dosado estequiométrico se puede calcular con la fórmula del dosado (1.1):

$$f_{est,propano} = \frac{1mol * 44g/mol}{23.80moles * 28.84g/mol} = 0.0641$$

Análogamente se puede calcular el dosado estequiométrico de los demás combustibles considerados en este trabajo. Estos se representan en la siguiente tabla:

$(CH_2)_n$	metano	propano	octano	benceno	methyl alc	ethyl alc
0.0676	0.0582	0.0641	0.0664	0.0757	0.155	0.111
gasolina	diesel	queroseno	CO	gas natural	C puro	hidrógeno
0.0654	0.0689	0.0682	0.4079	0.0589	0.0874	0.0291

Tabla 1.1: Tabla de dosados estequiométricos para cada combustible

Para poder evaluar de manera más clara y homogénea la dosificación en la combustión, para cualquiera de los combustibles, se usa un parámetro conocido como el dosado relativo, su fórmula es la siguiente:

$$f_{rel} = \frac{f}{f_{est}}$$

Cuando el dosado relativo sea igual a la unidad, el dosado coincidirá con el dosado estequiométrico, y todo el oxígeno del aire se consume en el proceso de combustión. Si el dosado relativo es menor que la unidad, se está ante una mezcla pobre en combustible, dándose exceso de aire. En el caso de que el dosado relativo sea superior a la unidad, se está ante una mezcla rica en combustible, y significa que no existe suficiente oxígeno para que se produzca una combustión completa. Este último caso es el que se debe evitar, pues incumple el criterio de combustión completa que se ha asumido como cierto, dado que se generarían productos como el monóxido de carbono (CO), que no se han tenido en absoluto en cuenta en el proyecto.

Por lo tanto, el dosado relativo es adecuado que sea menor o igual a la unidad, $f_{rel} \leq 1$.

Los dosados a introducir dependerán de la aplicación que queremos fijar, si no se da combustión y es todo aire, fijaremos dosado nulo. En el caso de una turbina de gas, la mezcla de gases a la salida de la combustión generalmente posee una gran cantidad de aire (aunque la propia combustión se realice prácticamente a dosado estequiométrico), por lo que la mezcla tiene un dosado relativo pobre (dosados en torno a 1/70 o 1/200 incluso). Si se centra en motores alternativos de combustión interna, el dosado relativo ya suele estar más cercano a la unidad.

Por último, comentar que el dosado o el dosado relativo tiene que ser siempre conocido, por lo que es un dato de entrada que debe ser introducido por el usuario en la interfaz del programa.

1.2. Definición de propiedades

A continuación se definen las propiedades² que se consideran en este trabajo para establecer el estado de los gases productos de la combustión, y que en la interfaz del programa pueden ser tratadas tanto como datos de entrada suministrados por el usuario o, en caso contrario, se calculan y se muestran como resultados.

1.2.1. Temperatura

La temperatura es una propiedad intensiva, es decir, que no depende de la cantidad de materia de la sustancia. Se trata de una propiedad que cuantifica la energía interna de un cuerpo, a través de la actividad o movimiento de sus partículas. Nótese que, al considerar gas ideal, la energía interna es sólo función de la temperatura. Se trata sin duda de una de las variables más útiles usada en el programa, principalmente como dato de entrada, debido a su facilidad de medida.

La totalidad de las propiedades de las que se va a hablar en los apartados subsiguientes depende de la temperatura, debido al modelo de gas ideal mostrado en el apartado A.1.1. La unidad a utilizar es la escala absoluta Kelvin(K) o los grados Celcius($^{\circ}C$), y es definida por el usuario en la interfaz del programa.

1.2.2. Calores específicos

Los calores específicos son propiedades intensivas que se relacionan con la energía interna, y es por definición, la cantidad de calor por unidad de masa que necesita una sustancia para elevar la temperatura $1^{\circ}C$. Es una propiedad de gran utilidad cuando se aplica el modelo de gas ideal, dado que sólo es dependiente de la temperatura. Esto repercute en que sea más sencillo determinar las propiedades de entalpía(h) y entropía específica(ϕ), pues dependen del calor específico a presión constante (C_p). El modo de calcular el calor específico a presión constante es precisamente un punto importante en los dos métodos de cálculo que serán definidos más adelante (apartado 1.3).

El calor específico a volumen constante(C_v) se calcula posteriormente gracias a la ecuación (A.4) del anexo A. Se utiliza para hallar la relación de calores específicos ($\gamma = C_p/C_v$), que es necesaria para el cálculo de la velocidad del sonido en la mezcla de gases. Esta propiedad se define en un apartado posterior.

²Las demostraciones de las ecuaciones mostradas en esta sección se incluyen en el apartado A.1.1.

1.2.3. Entalpía

La entalpía es una propiedad termodinámica, por definición la entalpía de un cuerpo es la suma de su energía interna más el producto de su volumen por la presión exterior. En este proyecto, tanto en las ecuaciones como al referirse a la entalpía se habla en realidad de entalpía específica, dado que se expresa siempre por unidad de masa, las unidades son $[\frac{kJ}{kgK}]$.

Se trata de una propiedad de gran importancia en el análisis termodinámicos de equipos, al realizar balances de energía, así como en la determinación de rendimientos en ciclos. Para su cálculo se utiliza la ecuación (A.5) determinada en el anexo A, que también se muestra a continuación:

$$h \equiv \int_{T_{ref}}^T C_p dT$$

1.2.4. Entropía

El concepto de entropía nace de la necesidad de cuantificar la segunda ley de la termodinámica. Se trata de una propiedad termodinámica, de gran complejidad en cuanto a su comprensión. Se entiende por entropía una medida del desorden, esta relacionada con las limitaciones de las maquinas térmicas (2ª ley), sus irreversibilidades, y mide una parte de la energía de un sistema que no puede ser utilizada para producir trabajo.

En los cálculos se utilizan las ecuaciones Tds (A.9) (A.10) para la entropía, concretamente la segunda ecuación de (A.12). En este proyecto se usa para el cálculo de la presión, y para el cálculo de la misma entre dos estados se supone que el proceso es internamente reversible y por tanto **la variación de entropía es nula** ($\Delta s = 0$). Esta suposición es una aproximación válida, y se suele considerar a menudo este modelo isoentrópico en procesos reales.

Se define una propiedad termodinámica, que en este proyecto se denomina **entropía específica** ϕ (en algunas referencias como [4] y [5] esta se muestra como s^0), que detalla la contribución a la entropía por parte de la temperatura, y que sólo depende de esta última. Esta propiedad se observa en el primer término de la misma ecuación (A.12) nombrada en el párrafo anterior:

$$\phi \equiv \int_{T_{ref}}^T C_p \frac{dT}{T}$$

y sus unidades son $[kJ/kgK]$.

1.2.5. Presión y presión relativa

Para poder calcular la presión se define otra propiedad, que análogamente a las anteriores, depende de la temperatura. Esta es la presión relativa, que es una variable adimensional, y su ecuación es:

$$P_r \equiv \exp\left(\frac{\phi - \phi_0}{R}\right)$$

El verdadero uso de esta variable es la relación que se obtiene desarrollando la ecuación (A.12), dicha relación es:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{r2}}{P_{r1}}$$

Se observa en esta ecuación la utilidad de la presión relativa: La relación de presiones relativas esta asociada a la relación de presiones y, suponiendo proceso isoentrópico como se ha aclarado en el apartado anterior, se puede hallar la presión de un estado final 2 en caso de conocer su P_{r2} (función de la temperatura) si está definido un estado inicial 1 (P_1 y P_{r1}).

El valor de referencia para la entropía específica usado en la definición de presión relativa corresponde al definido en la referencia [1], y es el valor de ϕ_0 que corresponde a la entropía específica a cero grados Celsius. En otras bibliografías, como en [4] (p.32) se usan otros valores de referencias muy diferentes. Nótese que aunque los valores de presión relativa cambien debido a la referencia, esto no afecta a la ecuación para hallar la presión, dado que la relación $\frac{P_{r2}}{P_{r1}}$ será la misma.

1.2.6. Velocidad del sónico

La última propiedad a definir en este trabajo es la velocidad del sonido en la mezcla de gases (a), se halla a partir de la relación de los calores específicos, la constante de los gases y la temperatura con la siguiente ecuación:

$$a = \sqrt{\gamma RT}$$

Esta propiedad es imprescindible para caracterizar el flujo compresible, determinando si este es supersónico o subsónico, en función de si la velocidad del sonido en los gases (a) es superior o inferior a la velocidad del sonido en el aire atmosférico. Esto es de gran importancia en las turbinas de gas para propulsión aérea. Destacar que esta propiedad es siempre calculada

por el programa, y no es posible introducirla como dato de entrada, a diferencia del resto de propiedades.

1.3. Descripción de métodos

En este apartado se va explicar los dos métodos utilizados para determinar las propiedades de los gases de combustión y aire. El objetivo principal es hallar el calor específico a presión constante de los mismos para determinar luego las propiedades deseadas, desarrolladas en el anexo A y mostradas en el apartado anterior 1.2.

1.3.1. Primer método

Este método se explica extensamente en la referencia [1], y define el cálculo de propiedades de aire y gases de combustión para un único combustible tipo hidrocarburo de la forma $(CH_2)_n$. A continuación se abordan los puntos mas importantes del mismo.

En el caso de no considerar los calores específicos constantes, estos dependen únicamente de la temperatura, por lo tanto se pueden aproximar, al depender solo de una variable, por una serie polinómica general. Las constantes de esta función se determinan experimentalmente, se mide del calor específico a presión constante y no a volumen constante debido a que es más sencilla su medición. La ecuación polinómica es la siguiente:

$$C_p = A_0 + A_1T + A_2T^2 + A_3T^3 + A_4T^4 + A_5T^5 + A_6T^6 + A_7T^7 \quad (1.2)$$

Con la ecuación (A.4) se puede obtener C_v a partir de C_p .

La entalpía (A.5) y la entropía específica (A.14) dependen de C_p y por lo tanto de la temperatura, por lo que análogamente a la ecuación (1.2) e integrando propiamente podemos obtener sus valores con una serie polinómica:

$$h = h_{ref} + A_0T + \frac{A_1}{2}T^2 + \frac{A_2}{3}T^3 + \frac{A_3}{4}T^4 + \frac{A_4}{5}T^5 + \frac{A_5}{6}T^6 + \frac{A_6}{7}T^7 + \frac{A_7}{8}T^8 \quad (1.3)$$

$$\phi = \phi_{ref} + A_0 \ln T + A_1T + \frac{A_2}{2}T^2 + \frac{A_3}{3}T^3 + \frac{A_4}{4}T^4 + \frac{A_5}{5}T^5 + \frac{A_6}{6}T^6 + \frac{A_7}{7}T^7 \quad (1.4)$$

Las constantes y los valores de referencia usados en este método y obtenidos de la integración

en las ecuaciones (1.2)(1.3)(1.4) tanto para el aire como productos de combustión se detallan en la siguiente tabla:

	Aire	Productos de combustión (Aire + $(CH_2)_n$)
A_0	$2.5020051 * 10^{-1}$	$7.3816638 * 10^{-2}$
A_1	$-5.153687 * 10^{-5}$	$1.2258630 * 10^{-3}$
A_2	$6.5519486 * 10^{-8}$	$-1.3771901 * 10^{-6}$
A_3	$-6.7178376 * 10^{-12}$	$9.9686793 * 10^{-10}$
A_4	$-1.5128259 * 10^{-14}$	$-4.2051104 * 10^{-13}$
A_5	$7.6215767 * 10^{-18}$	$1.0212923 * 10^{-16}$
A_6	$-1.4526770 * 10^{-21}$	$-1.3335668 * 10^{-20}$
A_7	$1.0115540 * 10^{-25}$	$7.2678710 * 10^{-25}$
h_{ref}	-1.7558886 [But/lbm]	30.58153 [But/lbm]
ϕ_{ref}	0.0454323 [But/lbm°R]	0.6483398 [But/lbm°R]

Tabla 1.2: Constantes para el aire y gases de combustión de $(CH_2)_n$

Con la información de esta tabla podemos conocer las propiedades anteriormente mencionadas para el aire y los productos de la combustión completa del $(CH_2)_n$ por separado, para conocer el de la mezcla de gases de combustión se realiza una ponderación de las propiedades con la relación másica combustible-aire (dosado):

$$C_p = \frac{C_{p,air} + fC_{p,prod}}{1 + f} \quad h = \frac{h_{air} + fh_{prod}}{1 + f} \quad \phi = \frac{\phi_{air} + f\phi_{prod}}{1 + f} \quad (1.5)$$

El valor para la constante R de la mezcla de gases se calcula con la siguiente fórmula en función del dosado:

$$R = \frac{1.9857117}{28.97 - 0.946186f} \quad \left[\frac{But}{lbmR} \right] \quad (1.6)$$

Entonces el proceso de cálculo radica en, si por ejemplo el dato entrada es la temperatura, obtener los valores de C_p , h y ϕ para el aire y los gases producto de la combustión separadamente con las ecuaciones (1.2)(1.3)(1.4) usando los datos de la tabla 1.2.

A continuación, con el dosado, que también ha sido introducido, podemos hallar las propiedades de la mezcla aire más gases producto de la combustión con las ecuaciones (1.5), y posteriormente los valores de velocidad del sonido en el gas y presión relativa. Esta última puede ser utilizada para hallar la presión en el caso de que se suministren datos extra con la relación de la ecuación (A.16).

En el caso de que sea otra de las propiedades nombradas anteriormente la introducida como valor de entrada en lugar de la temperatura, el procedimiento para su resolución, dado que

solo depende del dosado, que es dato de entrada, y la temperatura, consistirá en realizar el proceso inverso, se halla la temperatura mediante un proceso iterativo. Una vez obtenida la temperatura ya se pueden calcular las demás propiedades como se ha definido en el párrafo anterior.

1.3.2. Segundo método

En este apartado se muestra una explicación detallada del segundo método de cálculo, desarrollado extensamente en [3] por el doctor Abhijit Guha, profesor facultativo del departamento de ingeniería aeroespacial de la universidad de Bristol.

En este artículo se aborda la idea de conseguir un método de cálculo de propiedades que no requiera un excesivo coste computacional. El objetivo es hallar un compromiso, presentar un método con ecuaciones relativamente sencillas pero que, a la vez, su exactitud pueda ser cercana a un método de dimensiones más complejas.

Análisis termodinámico

Un aspecto relevante de este método es que está orientado para poder ser aplicado con un gran número de combustibles, para ello, el primer paso es definir la formula química equivalente de cada combustible (se representan en la figura 1.3). Cada uno de ellos se puede denotar con la fórmula $C_{n_C}H_{n_H}O_{n_O}$ (p. ej. propano: C_3H_8 $n_C = 3$, $n_H = 8$, $n_O = 0$).³

Por lo tanto, el ajuste de la ecuación estequiométrica de combustión despreciando la disociación y suponiendo combustión completa resulta:

$$C_{n_C}H_{n_H}O_{n_O} + (n_C + \frac{n_H}{4} - \frac{n_O}{2})O_2 = n_CCO_2 + \frac{n_H}{2}H_2O \quad (1.7)$$

De la definición de dosado (1.1) podemos obtener los moles de aire necesarios en función de los moles de combustible y el propio dosado:

$$n_{air} = \frac{n_{combust}M_{combust}}{fM_{air}}$$

siendo $M_{combust}$ y M_{air} los pesos moleculares del combustible y del aire respectivamente.

³La inclusión del oxígeno es debido a los alcoholes, como ya se ha comentado.

Relación termodinámica

El cálculo del calor específico a presión constante de los productos de combustión se obtiene de forma general de la contribución al calor específico de cada componente, siendo y_i la fracción másica de cada componente i :

$$C_p = \sum y_i C_{p,i} \quad (1.8)$$

Si se desarrolla la ecuación (1.8), teniendo en cuenta la composición de la reacción (1.7) y la definición de dosado podemos obtener la siguiente ecuación:

$$\frac{C_p}{C_{p,air}} = \frac{1 + fS}{1 + f} \quad (1.9)$$

donde

$$S = n_C \frac{M_{CO_2}}{M_{combust}} \frac{C_{p,CO_2}}{C_{p,air}} + \frac{n_H}{2} \frac{M_{H_2O}}{M_{combust}} \frac{C_{p,H_2O}}{C_{p,air}} - \left(n_C + \frac{n_H}{4} - \frac{n_O}{2} \right) \frac{M_{O_2}}{M_{combust}} \frac{C_{p,O_2}}{C_{p,air}} \quad (1.10)$$

La ecuación (1.9) es exacta para cualquier dosado y combustible hidrocarburo. El calor específico a presión constante se puede calcular con esta ecuación de forma muy precisa sustituyendo los términos de calor específico de cada componente gas de la ecuación (1.10) por su equivalente polinómico en función de la temperatura. Dicho uso tendría un alto coste computacional, especialmente al hallar otras propiedades en función del calor específico como la entalpía, o cuando se desea conocer la temperatura a partir de otra propiedad.

Descripción del método

La obtención de un procedimiento menos complejo se consigue con la simplificación de lo definido en el apartado anterior, más exactamente en establecer la relación entre los calores específicos correspondientes a la ecuación (1.10). Esto se lleva acabo con un estudio de su comportamiento en función de la temperatura, se profundiza en este aspecto en [3](p.379).

La ecuación resultante de dicho trabajo es

$$\frac{C_p}{C_{p,air}} = \frac{1 + f(\mathfrak{I}_0 + \mathfrak{I}_1 T + \mathfrak{I}_2/T^2)}{1 + f} \quad (1.11)$$

donde

$$\mathfrak{S}_0 = \frac{18.0566n_C + 8.3485n_H + 15.1616n_O}{M_{combust}} \quad \mathfrak{S}_1 = \frac{0.00223n_H}{M_{combust}} \quad \mathfrak{S}_2 = \frac{1077768.4n_C}{M_{combust}}$$

Las constantes \mathfrak{S}_i están definidas en la tabla 1.3 y como se puede observar, sólo dependen del tipo combustible, en concreto de su composición y peso molecular. Esto nos deja ver el potencial de la ecuación (1.11), con la cuál podemos obtener el calor específico a presión constante de los productos de combustión del combustible deseado conociendo la temperatura y el dosado, de forma análoga a la ecuación (1.5) en el primer método.

Equivalentemente a la ecuación (1.9), se puede hallar la constante específica de los productos de combustión:

$$\frac{R}{R_{air}} = \frac{1 + f\mathfrak{R}}{1 + f} \quad (1.12)$$

donde \mathfrak{R} es una constante de características similares a las de la ecuación (1.11), cuyo valor es:

$$\mathfrak{R} = \frac{M_{air}}{M_{combust}} \left(\frac{n_H}{4} + \frac{n_O}{2} \right)$$

Los valores de la constante \mathfrak{R} que se definen para cada combustible se especifican también en la tabla 1.3. El calor específico a volumen constante ya se puede hallar usando la ecuación (A.4).

Las fórmulas equivalentes de combustibles como el diesel, gas natural o gasolina han sido estimadas en las fuentes mostradas en [3](p.380).

Cálculo de propiedades

Conocido el calor específico a presión constante de los gases producto de combustión, el cálculo de las propiedades sucesivas es prácticamente análogo al visto en el primer método. Cabe destacar que para el cálculo de $C_{p,air}$ se utiliza la ecuación (1.2), como ya se aclaró en el apartado 1.1.2, las propiedades del aire se hallan con los datos de la tabla 1.2.

La entalpía se calcula con la ecuación termodinámica ya conocida (A.5):

$$h = \int_{T_{ref}}^T C_p dT$$

Combustible	Formula equivalente	\mathfrak{R}	\mathfrak{S}_0	$\mathfrak{S}_1/10^{-4}$ (K^{-1})	$\mathfrak{S}_2/10^4$ (K^2)
<i>Metano</i>	CH_4	1.811	3.216	5.575	6.736
<i>Propano</i>	C_3H_8	1.317	2.749	4.054	7.348
<i>Octano</i>	C_8H_{18}	1.144	2.585	3.521	7.563
<i>Benzeno</i>	C_6H_6	0.557	2.031	1.715	8.291
<i>Alcohol Metílico</i>	CH_4O	1.358	2.082	2.788	3.363
<i>Alcohol Etilico</i>	C_2H_6O	1.260	2.204	2.909	4.686
<i>Gasolina</i>	C_7H_{17}	1.219	2.657	3.753	7.470
<i>Diesel</i>	$C_{12.9}H_{23.9}$	0.969	2.420	2.982	7.780
<i>Queroseno</i>	$C_{12}H_{23.5}$	1.016	2.465	3.129	7.721
<i>Monóxido de Carbono</i>	CO	0.517	1.186	0	3.849
<i>Gas natural</i>	$C_{1.07}H_{4.1}$	1.753	3.161	5.397	6.808
<i>Carbón</i>	C	0	1.505	0	8.981
<i>Hidrógeno</i>	H_2	7.249	8.349	22.30	0

Tabla 1.3: Constantes características de varios combustibles.

Y sustituyendo la ecuación del calor específico a presión constante (1.11) en la ecuación anterior obtenemos la ecuación de la entalpía a aplicar en este segundo método:

$$h = \frac{1}{1+f} \int_{T_{ref}}^T C_{p,air} (1 + f(\mathfrak{S}_0 + \mathfrak{S}_1 T + \mathfrak{S}_2/T^2)) dT \quad (1.13)$$

La entropía específica se calcula con la ecuación termodinámica ya conocida (A.14):

$$\phi \equiv \int_{T_{ref}}^T C_p \frac{dT}{T}$$

El procedimiento es completamente análogo a lo explicado con la entalpía. La ecuación para la entropía específica es entonces, sustituyendo la ecuación (1.11):

$$\phi = \frac{1}{1+f} \int_{T_{ref}}^T C_{p,air} (1 + f(\mathfrak{S}_0/T + \mathfrak{S}_1 + \mathfrak{S}_2/T^3)) dT \quad (1.14)$$

El resto de propiedades definidas se pueden hallar fácilmente con las propiedades anteriores. La presión reducida, conociendo la entropía específica, se determina con la ecuación ya mostrada en el apartado 1.2 y la velocidad del sonido lo mismo, conociendo los calores específicos.

1.4. Ejemplos del programa

En este apartado se va a mostrar algunos ejemplos de ejercicios resueltos mediante el uso del programa implementado en Visual Basic. El código del programa así como una explicación del desarrollo del mismo se puede encontrar en el anexo B.

La interfaz que aparece nada más ejecutar el programa se muestra en la figura 1.1. En ella se pueden distinguir tres secciones principales. La sección *Combustible* es obligatoria, para determinar la composición de la mezcla mediante la introducción del dosado o dosado relativo y el tipo de combustible.⁴ Para poder introducir el dosado relativo en vez del dosado sólo es necesario marcar la casilla correspondiente en la sección.

La sección *Datos estado 1* sirve para calcular todas las propiedades del aire y los gases de la combustión, definidas en el apartado de propiedades 1.2, a partir de una cualquiera de dichas propiedades (se selecciona una y a continuación se introduce su valor). La sección *Datos estado 2* se puede usar de forma completamente análoga a la sección *Datos estado 1*, pero su inclusión en la interfaz esta orientada al cálculo de la presión (definiendo una presión inicial en *Datos estado 1*), tal y como se ha explicado en el apartado 1.2.5. En esta sección también se puede introducir como propiedad de entrada la presión, para ello es necesario definir un estado inicial (Presión más otra propiedad en *Datos estado 1*).

1.1: Interfaz inicial

- **Ejemplo 1:** En una turbina de gas de un ciclo combinado se desea conocer la temperatura necesaria de los gases a la salida de la cámara de combustión, para una entalpía de los gases de 1000 kJ/kg . Combustible gas natural y dosado de la mezcla $1/100$.

Para la resolución de este ejemplo se elige el combustible y el dosado $1/100$ en la sección *Combustible*, y en la sección *Datos estado 1* elegimos la entalpía e introducimos el valor de 1000 kJ/kg . La interfaz de la solución se muestra en la figura 1.2.

⁴En el caso de que se trate sólo de aire no es necesario seleccionar combustible pero si poner dosado cero.

1.2: solución ejemplo 1

- **Ejemplo 2:** Aire inicialmente a 300 Kelvin y 1 atm es comprimido de forma reversible y adiabática hasta una presión final de 15 atm. Determinar la temperatura final del aire.

El proceso se considera isoentrópico al ser adiabático e internamente reversible, por lo que podemos aplicar las formulas de la presión (A.16) de este proyecto. El gas es solo aire, por lo que se indica dosado nulo en la sección de la interfaz *Combustible*. En la sección *Datos estado 2* se selecciona la opción de la presión y se escribe el valor del estado final de 15 atm. En la sección *Datos estado 1* se puede incluir ahora la presión inicial de 1 atm, además de seleccionar la temperatura y escribir su valor inicial de 300 Kelvin.

1.3: solución ejemplo 2

Se observa en la figura 1.3 la solución al ejemplo 2 ($T = 642.76$ Kelvin), así como el resto de propiedades de los dos estados inicial y final. Destacar que en la presión no se incluyen las unidades, ni en la solución ni al introducir los datos, las unidades que el usuario elija al introducir la presión en la interfaz (se deben mantener las mismas unidades en las dos secciones de datos si tal es el caso, como en el ejemplo 2) serán las mismas que las de la salida.

1.5. Comparación de métodos

En este último apartado se va a proceder a la comparación de los dos métodos propuestos en este proyecto. Hay que tener en cuenta que mientras que en el primer método solo se trata un combustible hidrocarburo general $(CH_2)_n$, el segundo método consta de trece combustibles diferentes. Para realizar la comparación se va a recurrir a los combustibles más similares en composición del segundo método con respecto al combustible del primero. Se utiliza para este propósito las composiciones mostrada en la tabla 1.3.

Para ser posible la comparación se define la relación $HC = n_H/n_C$, el valor para el combustible del primer método es $HC = 2$ para cualquier n . Si se halla esta relación para los combustibles hidrocarburos del segundo método se comprueba que los más similares son el queroseno ($HC = 1.958$), el diésel ($HC = 1.853$) y el octano ($HC = 2.25$). Estos tres combustibles son pues los elegidos para comparar con el combustible hidrocarburo $(CH_2)_n$.

Las variables que se han elegido para comparar son la entalpía(h), la entropía específica(ϕ) y la presión relativa(P_r). Estas se calcularán para varios dosados y temperaturas.

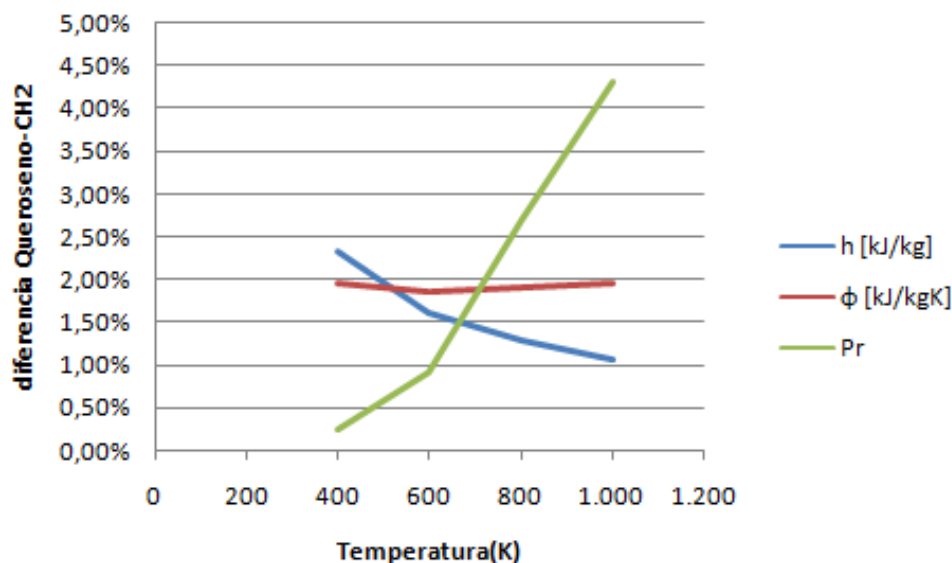
f = 0.0169				Queroseno			Diesel			Octano		
T(Kelvin)	h [kJ/kg]	ϕ [kJ/kgK]	Pr	h [kJ/kg]	ϕ [kJ/kgK]	Pr	h [kJ/kg]	ϕ [kJ/kgK]	Pr	h [kJ/kg]	ϕ [kJ/kgK]	Pr
400 K	405.1	6.99	3.89	414.6	7.13	3.88	414.5	7.13	3.88	415.6	7.14	3.89
600 K	615.6	7.42	17.17	625.8	7.56	17.33	625.3	7.56	17.32	627.1	7.58	17.37
800 K	835.9	7.74	51.69	846.84	7.89	53.13	846.13	7.88	53.07	848.7	7.90	53.31
1000 K	1066.1	7.99	126.3	1077.6	8.15	132.00	1076.6	8.14	131.8	1080.1	8.16	132.65
400 K				2.29%	1.96%	0.26%	2.27%	1.96%	0.26%	2.53%	2.10%	0.00%
600 K				1.63%	1.85%	0.92%	1.55%	1.85%	0.87%	1.83%	2.11%	1.15%
800 K				1.29%	1.90%	2.71%	1.21%	1.78%	2.60%	1.51%	2.03%	3.04%
1000 K				1.07%	1.96%	4.32%	0.98%	1.84%	4.17%	1.30%	2.08%	4.79%

1.4: Comparación a $f = 0.0169$

En la primera tabla mostrada 1.4 se observa la comparación para varias temperaturas (400K, 600K, 800K y 1000K) y para un único dosado, en este caso $f = 0.0169$, que corresponde a un dosado relativo de 0.25 para el hidrocarburo $(CH_2)_n$. En la parte inferior de la tabla se pueden ver las variaciones porcentuales de la propiedad de cada combustible del segundo método con respecto a las propiedades del hidrocarburo $(CH_2)_n$.

En general, para todos los combustibles, la entalpía(h) tiene una evolución proporcional con la temperatura; la entropía específica(ϕ) aumenta con la temperatura, pero el incremento se hace menos acusado conforme esta aumenta; mientras que la presión relativa, como se ve en los valores de la tabla, tiende a aumentar de forma exponencial con la temperatura. Estas tendencias se mantienen también a dosados más elevados.

En la figura 1.5, las variaciones son mínimas entre los distintos combustibles. Esto es debido



1.5: Variación Queroseno/CH₂ $f_{rel} = 0.25$

a que al tener un dosado bajo ($f = 0.0169$), la mayoría de la mezcla de gases esta compuesta de aire.

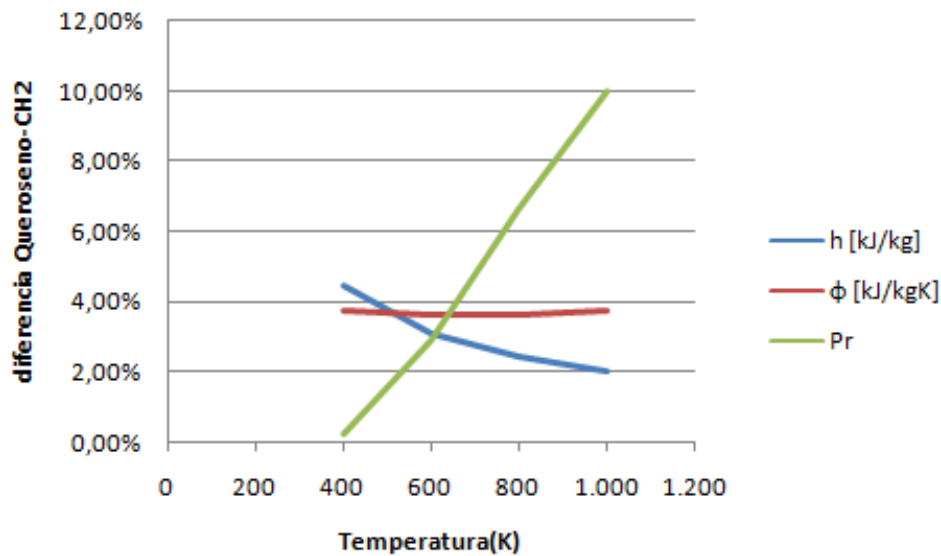
f = 0.0338				Queroseno			Diesel			Octano		
T(Kelvin)	h [kJ/kg]	φ [kJ/kgK]	Pr	h [kJ/kg]	φ [kJ/kgK]	Pr	h [kJ/kg]	φ [kJ/kgK]	Pr	h [kJ/kg]	φ [kJ/kgK]	Pr
400 K	409.20	7.00	3.98	428.30	7.27	3.97	427.70	7.26	3.97	429.89	7.29	3.98
600 K	624.05	7.44	18.05	644.10	7.72	18.59	643.17	7.71	18.56	646.77	7.74	18.65
800 K	849.50	7.76	55.72	871.04	8.05	59.73	869.64	8.04	59.59	874.78	8.08	60.08
1000 K	1,085.60	8.02	139.28	1,108.30	8.33	154.79	1,106.44	8.31	154.28	1,113.23	8.36	156.08
400 K				4.46%	3.71%	0.25%	4.33%	3.58%	0.25%	4.81%	3.98%	0.00%
600 K				3.11%	3.63%	2.90%	2.97%	3.50%	2.75%	3.51%	3.88%	3.22%
800 K				2.47%	3.60%	6.71%	2.32%	3.48%	6.49%	2.89%	3.96%	7.26%
1000 K				2.05%	3.72%	10.02%	1.88%	3.49%	9.72%	2.48%	4.07%	10.76%

1.6: Comparación a $f = 0.0338$

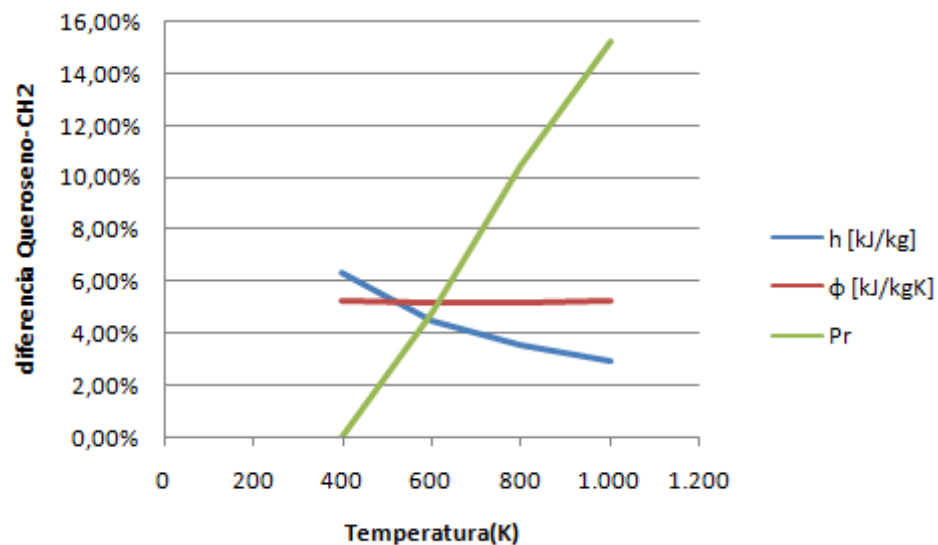
La tabla 1.6 corresponde a un dosado relativo de 0.5 para el combustible $(CH_2)_n$. Se observa como aumentan las variaciones entorno a un 2 % para la entalpía(h) y la entropía específica(ϕ), mientras que el aumento de Pr sucede forma más acusada, con variaciones entre los combustibles de hasta un 10 % a 1000 Kelvin. Estas observaciones se aprecian perfectamente en la figura 1.7.

La tabla 1.8 corresponde a un dosado relativo de 0.75 para el combustible $(CH_2)_n$. En este caso la entalpía(h) y la entropía(ϕ) también aumentan su variación entorno a otro 2 %, mientras que Pr varía en mayor grado, con valores de 15 % a 1000 Kelvin. Esto es debido al carácter exponencial de la ecuación de la presión relativa como ya se ha comentado.

Para finalizar con este apartado se destacan las tendencias generales de la variables. Todas

1.7: Variación Queroseno/CH2 $f_{rel} = 0.5$

f = 0.0507	Hidrocarburo CH2			Queroseno			Diesel			Octano		
T(Kelvin)	h [kJ/kg]	φ [kJ/kgK]	Pr	h [kJ/kg]	φ [kJ/kgK]	Pr	h [kJ/kg]	φ [kJ/kgK]	Pr	h [kJ/kg]	φ [kJ/kgK]	Pr
400 K	413.28	7.01	4.06	441.36	7.40	4.06	440.48	7.39	4.06	443.71	7.44	4.07
600 K	632.21	7.45	18.94	661.88	7.86	19.89	660.43	7.85	19.85	665.75	7.90	19.98
800 K	862.66	7.78	59.92	894.46	8.21	66.88	892.39	8.19	66.67	899.98	8.25	67.42
1000 K	1,104.50	8.05	153.04	1,137.98	8.50	180.52	1,135.24	8.48	179.71	1,145.27	8.54	182.56
400 K				6.36%	5.27%	0.00%	6.18%	5.14%	0.00%	6.86%	5.78%	0.25%
600 K				4.48%	5.22%	4.78%	4.27%	5.10%	4.58%	5.04%	5.70%	5.21%
800 K				3.56%	5.24%	10.41%	3.33%	5.01%	10.12%	4.15%	5.70%	11.12%
1000 K				2.94%	5.29%	15.22%	2.71%	5.07%	14.84%	3.56%	5.74%	16.17%

1.8: Comparación a $f = 0.0507$ 1.9: Variación Queroseno/CH2 $f_{rel} = 0.75$

las propiedades de los combustibles del segundo método varían más con respecto al combustible $(CH_2)_n$ conforme aumenta el dosado, esto es lógico dado que al incrementar el dosado cobra mas importancia los gases de la combustión de la mezcla aire y gases.

En términos porcentuales, la variaciones de la entalpía(h) se observan que son menores conforme aumenta la temperatura. La entropía específica(ϕ) mantiene la variación constante con la temperatura, todo esto denota que, en estas propiedades, la temperatura no juega un papel importante en la comparación entre combustibles. La presión relativa (Pr) es sin duda la propiedad que más cambia, especialmente a altas temperaturas, esto se comprende analizando la ecuación que define la presión relativa, que es la exponencial del cociente de la entropía específica(ϕ) y la constante de los gases (R). Al aumentar la temperatura solo se incrementa el numerador del cociente (ϕ), y con la exponencial este aumento se hace aún más notorio.

1.6. Conclusiones

El cálculo de propiedades termodinámicas de sustancias generalmente se caracteriza por métodos y programas informáticos complejos, con un alto coste computacional y de gran exactitud. En este proyecto se ha intentado llegar a un compromiso, con una reducción la complejidad, como con la aproximación a gas ideal, por lo que disminuye el coste computacional, pero a su vez se reduce ligeramente la exactitud.

El objetivo que se quería alcanzar se ha conseguido, se ha diseñado el programa requerido, con una interfaz sencilla que permite obtener de forma rápida propiedades de los productos de la combustión para diferentes combustibles y dosados, Además de poder realizarse los cálculos para que cualquiera de las propiedades pueda ser introducida como dato de entrada y se obtenga el resto, excepto la velocidad del sonido en la mezcla de gases, que se muestra siempre como resultado.

Se ha procedido también a la comparación de los dos métodos propuestos, observándose que, aunque el primer método sólo estudia un combustible, y es diferente a cualquiera los definidos en el segundo, se arrojan datos similares cuando se compara los combustibles más parecidos en composición entre los dos métodos.

Por último, como opciones para ampliar este trabajo, se podrían incluir cálculos de la entropía, y no tener en cuenta la suposición de proceso isoentrópico para calcular la presión. Así como incluir otras propiedades a calcular, como el volumen específico.

Bibliografía

- [1] Jack D. Mattingly. *Elements of gas turbine propulsion*. McGraw-Hill. 1996.
- [2] Yunus A. Çengel; Michael A. Boles. *Termodinámica*. McGraw-Hill. 5ª edición. 2006.
- [3] Abhijit Guha. *An efficient generic method for calculating the properties of combustion products*. IMechE Proc., Part A, J. Power and Energy, vol. 215, No. A3, p. 375-387. 2001.
- [4] William W. Bathie. *Fundamentals of gas turbines*. John Wiley & Sons, Inc. 1984.
- [5] Michael J. Moran; Howard N. Shapiro. *Fundamentos de termodinámica técnica*. Editorial Reverté, S.A. 2ª edición. 2004.
- [6] Philip P. Walsh; Paul Fletcher. *Gas turbine performance*. John Wiley & Sons, Inc. 2004.
- [7] Agencia Internacional de la Energía. <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS>.

A

Anexo A

En este anexo se muestra un resumen exhaustivo tanto de las ecuaciones que se usan para el cálculo de propiedades del primer método como el desarrollo matemático para alcanzar dichas ecuaciones.

A.1. Desarrollo de ecuaciones

En este apartado se van a desarrollar las ecuaciones pertinentes¹, con las consideraciones necesarias para llegar a definir cómo calcular las propiedades que permitan determinar el estado de un gas.

A.1.1. Gas ideal

Se empieza asumiendo el **modelo de gas ideal** en los cálculos, el desarrollo de las ecuaciones subsiguientes es importante para la comprensión de las propiedades que se definirán. La energía interna y entalpía dependen generalmente de dos propiedades independientes, pero bajo nuestra suposición estas propiedades solo dependen de la temperatura. Esta consideración conlleva cierto error, pero garantiza simplificaciones en los cálculos, lo que hace que este error se pueda asumir, especialmente a bajas densidades. Se analiza en profundidad las razones de la aplicación de este modelo en la referencia[5], (capítulo 3).

Ecuaciones del modelo de gas ideal:

$$Pv = RT \qquad u = u(T) \qquad (A.1)$$

¹En el desarrollo de las ecuaciones, las propiedades se muestran expresadas por unidad de masa.

siendo $R_u = 8.3143 \text{ [kJ/kmolK]}$ la constante universal de los gases y $R = \frac{R_u}{M}$ la específica para cada gas donde M es el peso molecular. De la definición de entalpía, que es una combinación de propiedades: $h = u + Pv$, y aplicando la ecuación (A.1) se puede observar que esta propiedad es solo función de la temperatura, $h = h(T)$. Expresada en forma diferencial:

$$dh = du + RdT \quad (\text{A.2})$$

La definición de los calores específicos, siendo γ la relación de calores específicos:

$$dh = C_p dT \quad du = C_v dT \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (\text{A.3})$$

La relación de calores específicos se obtiene aplicando sus definiciones en la ecuación (A.2) :

$$C_p = C_v + R \quad (\text{A.4})$$

Integrando las definiciones de calores específicos (A.3) se obtienen las variaciones de energía interna y entalpía para un gas ideal:

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_v dT \quad h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT$$

Se define a continuación la ecuación que se usa por conveniencia para el cálculo de la entalpía en este proyecto:

$$h \equiv \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (\text{A.5})$$

Para el cálculo de la entropía se usan las ecuaciones Tds que se desarrollan a continuación, estas permiten evaluar las variaciones de entropía a partir de datos de otras propiedades de medición más sencilla.

La expresión del balance de energía en un proceso internamente reversible sin movimientos del sistema y sin efectos de gravedad es la siguiente:

$$(\delta Q)_{intrev} = dU + (\delta W)_{intrev} \quad (\text{A.6})$$

Según la definición de variación entropía:

$$S_2 - S_1 = \left(\int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \right)_{intrev} \rightarrow dS = \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{intrev} \quad (\text{A.7})$$

Y el trabajo en un sistema cerrado:

$$(\delta W)_{intrev} = PdV \quad (\text{A.8})$$

Sustituyendo las ecuaciones (A.7) y (A.8) en (A.6) y expresándolas por unidad de masa se obtiene la primera ecuación Tds :

$$Tds = du + Pdv \quad (\text{A.9})$$

Diferenciando la definición de la entalpía: $h = u + Pv$ se obtiene:

$$dh = du + d(Pv) = du + Pdv + vdP \rightarrow du + Pdv = dh - vdP$$

y sustituyendo esta ecuación en la primera ecuación Tds (A.9) se consigue la segunda ecuación Tds :

$$Tds = dh - vdP \quad (\text{A.10})$$

Estas ecuaciones Tds sirven para calcular la variación de entropía de cualquier proceso, a pesar de que el desarrollo se ha realizado para un proceso internamente reversible. Esto es debido a que solo cuenta en la integración los estados iniciales y finales, independientes de los detalles del proceso.

Seguidamente despejamos la entropía de las ecuaciones Tds y sustituimos en ella la ecuaciones para gases ideales (A.1) y (A.3) y se obtiene las dos ecuaciones siguientes:

$$ds = C_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad ds = C_p \frac{dT}{T} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{A.11})$$

e integrándolas se obtiene finalmente las dos fórmulas para el cálculo de la entropía:

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_v \frac{dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1} \quad s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p \frac{dT}{T} + R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (\text{A.12})$$

Se pueden tomar dos consideraciones adicionales para simplificar el cálculo, a parte de considerar gas ideal. Los calores específicos constantes (independientes de la temperatura) y proceso isoentrópico ($ds = 0$). En los cálculos realizados en el programa se usa la simplificación de proceso isoentrópico para el cálculo de la presión.

Las ecuaciones resultantes con estas simplificaciones son:

$$\begin{aligned} u_2 - u_1 &= C_v(T_2 - T_1) & h_2 - h_1 &= C_p(T_2 - T_1) \\ \frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} & \frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\gamma-1} & \frac{P_2}{P_1} &= \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\gamma} \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

A continuación se va mostrar los cálculos para hallar la presión de un estado final, partiendo de un estado inicial conociendo su presión y una propiedad dependiente de la temperatura o conocida la misma, al propio estado final definido por una propiedad análoga a la del estado anterior. Esto solo se puede hacer partiendo la suposición de proceso isoentrópico, y se podría obtener este dato de presión con la primera ecuación (A.13).

En este trabajo se opta por otro camino, en el cuál sera necesario definir algunas propiedades adicionales, como la entropía específica, la cuál solo es función de la temperatura. Esta se encuentra en uno de los términos de la segunda ecuación (A.12). Esta propiedad muestra la contribución de la temperatura a la entropía, y se define como entropía específica ϕ .

$$\phi_2 - \phi_1 = \int_{T_1}^{T_2} C_p \frac{dT}{T}$$

En este proyecto, análogamente a la entalpía, se define por conveniencia la ecuación de la entropía específica a usar:

$$\phi \equiv \int_{T_{ref}}^T C_p \frac{dT}{T} \quad (\text{A.14})$$

Se concreta también un parámetro importante, se conoce como presión relativa(P_r) y es adimensional, su importancia se observa en los desarrollos subsiguientes.

$$P_r \equiv \exp\left(\frac{\phi - \phi_0}{R}\right) \quad (\text{A.15})$$

Donde ϕ_0 se define como la entropía específica de referencia a cero grados centígrados, el único propósito de este término es que se obtengan valores adecuados de P_r , en lo que respecta

al orden de magnitud. Se habla más de esto en el apartado 1.2.

Si expresamos de nuevo la segunda ecuación de (A.12), teniendo en cuenta proceso isentrópico y la definición de entropía específica:

$$\Delta s = 0 = \phi_2 - \phi_1 + R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

Despejando el cociente de presiones se obtiene:

$$\frac{P_2}{P_1} = \exp\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{R}\right) = \frac{\exp(\phi_2/R)}{\exp(\phi_1/R)}$$

Según la definición de presión relativa, y teniendo en cuenta que las referencias ϕ_0 se anulan, se tiene entonces que:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{r2}}{P_{r1}} \quad (\text{A.16})$$

Se observa ahora el porqué de la definición de presión relativa, su cociente esta directamente relacionado con el cociente de presiones para proceso isentrópico. Con el conocimiento de este parámetro, que solo depende de la temperatura en cuanto a propiedades, así como del dosado y tipo de combustible, se puede determinar presiones como se explica en el apartado 1.2.5.

A.1.2. Mezcla de gases

En este apartado se va a proceder a obtener las propiedades de una mezcla de gases ideales, para ello se recurre a la ley de Gibbs-Dalton. La presión de una mezcla de gases corresponde a la suma de las presiones parciales de cada componente i y análogamente, los moles totales de la mezcla corresponden a la suma de los moles de cada componente:

$$P_i = \frac{N_i R_u T}{V} \quad P = \sum_{i=1}^n P_i \quad N = \sum_{i=1}^n N_i \quad (\text{A.17})$$

Según la misma ley, la energía interna, la entalpía y la entropía total corresponde con la suma de dichas propiedades de cada componente cuando estos ocupan exclusivamente el volumen total y están a la temperatura de la mezcla.

$$U = \sum_{i=1}^n m_i u_i \quad [kJ] \qquad H = \sum_{i=1}^n m_i h_i \quad [kJ] \qquad S = \sum_{i=1}^n m_i s_i \quad \left[\frac{kJ}{K}\right] \quad (A.18)$$

y por último, de forma semejante, los calores específicos son:

$$c_p = \frac{\sum_{i=1}^n m_i c_{pi}}{m_{total}} \quad \left[\frac{kJ}{kgK}\right] \qquad c_v = \frac{\sum_{i=1}^n m_i c_{vi}}{m_{total}} \quad \left[\frac{kJ}{kgK}\right]$$

B

Anexo B

En este anexo se presenta el código que se ha desarrollado para el programa, se usa el software de programación *visual Basic Studio* para implementarlo.

La estructuración consta primero de una declaración de variables y constantes, estas últimas están incluidas en las tablas de la memoria 1.1, 1.2 y 1.3. A continuación se carga los nombres en el programa, todos los nombres de los combustibles y las propiedades para que estos aparezcan en la interfaz. Seguidamente, funciones de cálculo, las cuales hacen que el código este más ordenado, claro y no sea tan largo al no repetir procedimientos. A continuación, el evento principal del programa, cuando el usuario pulsa el botón *calcular*, donde se comienza con la lectura de las variables introducidas, y posteriormente en función del combustible, el dosado y la propiedad seleccionada se calculan el resto de las propiedades.

Al final se escriben algunos eventos, escritura de las unidades requeridas de la propiedad al elegirla en el *combobox* ($h \rightarrow kJ/kgK$ por ejemplo). O si se ha seleccionado para introducir el dosado relativo en vez del dosado.

Destacar, por último, que los comentarios en el código siguiente se inician con (//) mientras que en *visual Basic Studio* se emplean ('). Adicionalmente a este código, es necesario crear una interfaz con todos los elementos escritos en el código, tal y como se muestra en la figura 1.1.

```

1 Public class Form1
    Dim T1, T2, f, f_rel, f_est, P, R0, J0, J1, J2, val2, val1, Cp1, Cv1, h1,
    phi1, h2, Cp2, Cv2, phi2, P2 As Single
3    Dim method, unidadfrel, propselect1, propselect2 As Boolean
    Dim R_ch, R_R, Pr1, Pr2, phiref0, gamma1, gamma2, v1, v2 As Double
5    Dim unidadT, unidadT2 As String

7    //method=true primer metodo, method=false segundo metodo.

9    Public Const R_air As Double = 0.288205, Tref As Single = 273 //R_air para
    el segundo metodo, unidades kJ/kgK.

```

```

//Tref es cero grados centrigrados , referencia para la entropia especifica (
phi-0)

//Constantes primer metodo
Public Const A0c As Double = 7.3816638 * 10 ^ -2, A1c As Double = 1.225863 *
10 ^ -3
Public Const A2c As Double = -1.3771901 * 10 ^ -6, A3c As Double = 9.9686793
* 10 ^ -10
Public Const A4c As Double = -4.2051104 * 10 ^ -13, A5c As Double =
1.0212913 * 10 ^ -16
Public Const A6c As Double = -1.3335668 * 10 ^ -20, A7c As Double = 7.267871
* 10 ^ -25
Public Const hrefc As Double = 30.58153, phirefc As Double = 0.6483398 //
unidades but/lbm y but/(lbm *R)
Public Const A0a As Double = 0.25020051, A1a As Double = -5.1536879 * 10 ^
-5,
Public Const A2a As Double = 6.5519486 * 10 ^ -8, A3a As Double = -6.7178376
* 10 ^ -12
Public Const A4a As Double = -1.5128259 * 10 ^ -14, A5a As Double =
7.6215767 * 10 ^ -18
Public Const A6a As Double = -1.452677 * 10 ^ -21, A7a As Double = 1.011554
* 10 ^ -25
Public Const hrefa As Double = -1.7558886, phirefa As Double = 0.0454323 //
unidades but/lbm y but/(lbm *R)

//Constantes segundo metodo
Public Const R0_meth As Single = 1.811, J0_meth As Single = 3.216, J1_meth
As Single = 5.575 * 10 ^ -4, J2_meth As Single = 6.736 * 10 ^ 4
Public Const R0_prop As Single = 1.317, J0_prop As Single = 2.749, J1_prop
As Single = 4.054 * 10 ^ -4, J2_prop As Single = 7.348 * 10 ^ 4
Public Const R0_oct As Single = 1.144, J0_oct As Single = 2.585, J1_oct As
Single = 3.521 * 10 ^ -4, J2_oct As Single = 7.563 * 10 ^ 4
Public Const R0_benz As Single = 0.557, J0_benz As Single = 2.031, J1_benz
As Single = 1.715 * 10 ^ -4, J2_benz As Single = 8.291 * 10 ^ 4
Public Const R0_methyl As Single = 1.358, J0_methyl As Single = 2.082,
J1_methyl As Single = 2.788 * 10 ^ -4, J2_methyl As Single = 3.368 * 10 ^ 4
Public Const R0_ethyl As Single = 1.26, J0_ethyl As Single = 2.204, J1_ethyl
As Single = 2.909 * 10 ^ -4, J2_ethyl As Single = 4.686 * 10 ^ 4
Public Const R0_gasos As Single = 1.219, J0_gasos As Single = 2.657, J1_gasos
As Single = 3.753 * 10 ^ -4, J2_gasos As Single = 7.47 * 10 ^ 4
Public Const R0_die As Single = 0.969, J0_die As Single = 2.42, J1_die As
Single = 2.982 * 10 ^ -4, J2_die As Single = 7.78 * 10 ^ 4
Public Const R0_kero As Single = 1.016, J0_kero As Single = 2.465, J1_kero
As Single = 3.129 * 10 ^ -4, J2_kero As Single = 7.721 * 10 ^ 4
Public Const R0_CO As Single = 0.517, J0_CO As Single = 1.186, J1_CO As
Single = 0, J2_CO As Single = 3.849 * 10 ^ 4
Public Const R0_natu As Single = 1.753, J0_natu As Single = 3.161, J1_natu
As Single = 5.397 * 10 ^ -4, J2_natu As Single = 6.808 * 10 ^ 4
Public Const R0_C As Single = 0, J0_C As Single = 1.505, J1_C As Single = 0,
J2_C As Single = 8.981 * 10 ^ 4
Public Const R0_H As Single = 7.243, J0_H As Single = 8.349, J1_H As Single
= 22.3 * 10 ^ -4, J2_H As Single = 0

//Dosados estequiometricos para cada combustible
Public Const f_ch2 As Single = 0.0678, f_meth As Single = 0.0582, f_prop As
Single = 0.0641, f_oct As Single = 0.0664, f_benz As Single = 0.0757
Public Const f_methyl As Single = 0.155, f_ethyl As Single = 0.111, f_gasos
As Single = 0.0654, f_die As Single = 0.0689, f_kero As Single = 0.0682

```



```

Public Const f_CO As Single = 0.4079, f_natu As Single = 0.0589, f_C As
Single = 0.0874, f_H As Single = 0.0291

Private Sub form1_load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.
EventArgs) Handles MyBase.Load

    Me.Text = " Calculo de Propiedades de aire y gases de combustion" //
    titulo
    //nombres anadidos a cada desplegable en la interfaz, combustible,
    estado 1 y estado 2.
    ComboBoxcombustible.Items.Add("(CH2)n")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("Metano")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("Propano")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("Octano")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("Alcohol metilico")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("Alcohol etilico")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("Gasolina")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("Diesel")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("Queroseno")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("CO")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("Gas natural")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("Carbon puro")
    ComboBoxcombustible.Items.Add("Hidrogeno")

    ComboBoxprop2.Items.Add("Presion relativa (Pr)")
    ComboBoxprop2.Items.Add("Entropia especifica (phi)")
    ComboBoxprop2.Items.Add("Presion (P)")
    ComboBoxprop2.Items.Add("Entalpia (h)")
    ComboBoxprop2.Items.Add("Temperatura (T)")
    ComboBoxprop2.Items.Add("Calor especifico (Cp)")

    ComboBoxprop1.Items.Add("Presion relativa (Pr)")
    ComboBoxprop1.Items.Add("Entropia especifica (phi)")
    ComboBoxprop1.Items.Add("Entalpia (h)")
    ComboBoxprop1.Items.Add("Temperatura (T)")
    ComboBoxprop1.Items.Add("Calor especifico (Cp)")
    //partes inicialmente no visibles, botones asociados a temperatura,
    checkbox de dosado relativo, labels.
    unidadfrel = False
    RadiobuttonTK.Visible = False
    RadioButtonTK2.Visible = False
    RadioButtonTC.Visible = False
    RadioButtonTC2.Visible = False
    LabelP.Visible = False
    TextBoxP.Visible = False
    propselect1 = False
    propselect2 = False

    RadiobuttonTK.Checked = True
    RadioButtonTK2.Checked = True

    Labelprop1.Text = ""
    Labelprop2.Text = ""

End Sub

```

```

95 //Funciones asociadas al calculo en el primer metodo, las del aire se
    aplican tambien en el segundo.

97 Private Function Cp_prod_ch(ByVal Temp As Single) As Double
    Dim Cp_prod_chR, TempR As Double
99    TempR = 9 * Temp / 5 //pasar a Rankine
    Cp_prod_chR = A0c + A1c * TempR + A2c * TempR ^ 2 + A3c * TempR ^ 3 +
    A4c * TempR ^ 4 + A5c * TempR ^ 5 + A6c * TempR ^ 6 + A7c * TempR ^ 7 //but
    /(lbm *R)
101    Cp_prod_ch = Cp_prod_chR * (9 * 1.05526) / (5 * 0.45359) //kJ/(kgK)
    Return Cp_prod_ch
103 End Function

105 Private Function Cp_air_ch(ByVal Temp As Single) As Double
    Dim Cp_air_chR, TempR As Double
107    TempR = 9 * Temp / 5 //pasar a Rankine
    Cp_air_chR = A0a + A1a * TempR + A2a * TempR ^ 2 + A3a * TempR ^ 3 + A4a
    * TempR ^ 4 + A5a * TempR ^ 5 + A6a * TempR ^ 6 + A7a * TempR ^ 7 //but/(
    lbm *R)
109    Cp_air_ch = Cp_air_chR * (9 * 1.05526) / (5 * 0.45359) //kJ/(kgK)
    Return Cp_air_ch
111 End Function

113 Private Function h_prod_ch(ByVal Temp As Single) As Double
    Dim h_prod_chR, TempR As Double
115    TempR = 9 * Temp / 5 //pasar a Rankine
    h_prod_chR = A0c * TempR + A1c * TempR ^ 2 / 2 + A2c * TempR ^ 3 / 3 +
    A3c * TempR ^ 4 / 4 + A4c * TempR ^ 5 / 5 + A5c * TempR ^ 6 / 6 + A6c * TempR
    ^ 7 / 7 + A7c * TempR ^ 8 / 8 + hrefc // but/lbm
117    h_prod_ch = h_prod_chR * 1.05526 / 0.45359 //kJ/kg
    Return h_prod_ch
119 End Function

121 Private Function h_air_ch(ByVal Temp As Single) As Double
    Dim h_air_chR, TempR As Double
123    TempR = 9 * Temp / 5 //pasar a Rankine
    h_air_chR = A0a * TempR + A1a * TempR ^ 2 / 2 + A2a * TempR ^ 3 / 3 +
    A3a * TempR ^ 4 / 4 + A4a * TempR ^ 5 / 5 + A5a * TempR ^ 6 / 6 + A6a * TempR
    ^ 7 / 7 + A7a * TempR ^ 8 / 8 + hrefa // but/lbm
125    h_air_ch = h_air_chR * 1.05526 / 0.45359 //kJ/kg
    Return h_air_ch
127 End Function

129 Private Function phi_prod_ch(ByVal Temp As Single) As Double
    Dim phi_prod_chR, TempR As Double
131    TempR = 9 * Temp / 5 //pasar a Rankine
    phi_prod_chR = A0c * Math.Log(TempR) + A1c * TempR + A2c * TempR ^ 2 / 2
    + A3c * TempR ^ 3 / 3 + A4c * TempR ^ 4 / 4 + A5c * TempR ^ 5 / 5 + A6c *
    TempR ^ 6 / 6 + A7c * TempR ^ 7 / 7 + phirefc //but/(lbm *R)
133    phi_prod_ch = phi_prod_chR * (9 * 1.05526) / (5 * 0.45359) //kJ/(kg*K)
    Return phi_prod_ch
135 End Function

137 Private Function phi_air_ch(ByVal Temp As Single) As Double
    Dim phi_air_chR, TempR As Double
139    TempR = 9 * Temp / 5 //pasar a Rankine
    phi_air_chR = A0a * Math.Log(TempR) + A1a * TempR + A2a * TempR ^ 2 / 2
    + A3a * TempR ^ 3 / 3 + A4a * TempR ^ 4 / 4 + A5a * TempR ^ 5 / 5 + A6a *

```

```

TempR ^ 6 / 6 + A7a * TempR ^ 7 / 7 + phirefa //but/(lbm *R)
141   phi_air_ch = phi_air_chR * (9 * 1.05526) / (5 * 0.45359) //kJ/(kg*K)
      Return phi_air_ch
143   End Function

145   //Funciones CalcularT_X_metY, para calcular la temperatura en funcion de la
      variable X (Cp, h o phi) y con el metodo Y (1 o 2). Proceso iterativo.

147   Private Function CalcularT_h_met1(ByVal entalpia As Single) As Double
      Dim dif, i As Single
149       i = 0.1
      dif = 100
151       Do While (Math.Abs(dif) > 0.01)
          dif = ((h_air_ch(i) + f * h_prod_ch(i)) / (1 + f)) - entalpia
153           i = i + 0.005
      Loop
155       CalcularT_h_met1 = i
      Return CalcularT_h_met1
157   End Function

159   Private Function CalcularT_h_met2(ByVal entalpia As Single) As Double
      Dim dif, i As Single
161       i = 0.1
      dif = 100
163       Do While (Math.Abs(dif) > 0.01)
          dif = (h_air_ch(i) + f * ((Cp_air_ch(i) + Cp_air_ch(0)) / 2) * (J0 *
165   i + J1 * i ^ 2 / 2 + J2 / i)) / (1 + f) - entalpia
          i = i + 0.005
      Loop
167       CalcularT_h_met2 = i
      Return CalcularT_h_met2
169   End Function

171   Private Function CalcularT_Cp_met1(ByVal caloresp As Single) As Double
      Dim dif, i As Single
173       i = 0.1
      dif = 100
175       Do While (Math.Abs(dif) > 0.001)
          dif = ((Cp_air_ch(i) + f * Cp_prod_ch(i)) / (1 + f)) - caloresp
177           i = i + 0.0005
      Loop
179       CalcularT_Cp_met1 = i
      Return CalcularT_Cp_met1
181   End Function

183   Private Function CalcularT_Cp_met2(ByVal caloresp As Single) As Double
      Dim dif, i As Single
185       i = 0.1
      dif = 100
187       Do While (Math.Abs(dif) > 0.001)
          dif = Cp_air_ch(i) * (1 + f * (J0 + J1 * i - J2 / i ^ 2)) / (1 + f)
- caloresp
189           i = i + 0.0005
      Loop
191       CalcularT_Cp_met2 = i
      Return CalcularT_Cp_met2
193   End Function

```

```

195 Private Function CalculaT_phi_met1(ByVal entropia As Single) As Double
196     Dim dif, i As Single
197     i = 50
198     dif = 100
199     Do While (Math.Abs(dif) > 0.001)
200         dif = (phi_air_ch(i) + f * phi_prod_ch(i)) / (1 + f) - entropia
201         i = i + 0.0005
202     Loop
203     CalculaT_phi_met1 = i
204     Return CalculaT_phi_met1
205 End Function

207 Private Function CalculaT_phi_met2(ByVal entropia As Single) As Double
208     Dim dif, i As Single
209     i = 50
210     dif = 100
211     Do While (Math.Abs(dif) > 0.001)
212         dif = (phi_air_ch(i) + f * ((Cp_air_ch(i) + Cp_air_ch(0)) / 2) * (J0
213 * Math.Log(i) + J1 * i + J2 / (2 * i ^ 2))) / (1 + f) - entropia
214         i = i + 0.0005
215     Loop
216     CalculaT_phi_met2 = i
217     Return CalculaT_phi_met2
218 End Function

219 //evento principal, iniciar los calculos

221 Private Sub ButtonCalc_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles ButtonCalc.Click

223
224 //lectura de datos de entrada
225 val1 = Val(TextBoxprop1.Text)
226 val2 = Val(TextBoxprop2.Text)
227 P = Val(TextBoxP.Text)

228
229 //En caso de que se haya seleccionado el dosado relativo o no
230 If unidadfrel = True Then
231     f_rel = Val(TextBoxf.Text)
232     f = f_rel * f_est
233     Labelfresult.Text = " Dosado = " & Math.Round(f, 3)
234 Else
235     f = Val(TextBoxf.Text)
236     f_rel = f / f_est
237     Labelfresult.Text = " Dosado relativo = " & Math.Round(f_rel, 3)
238 End If

239

240 //Calculo de R y valor de referencia phi_0 para los dos metodos

241
242 If method = True Then
243     R.R = 1.9857117 / (28.97 - f * 0.946186) //but/(lbm *R)
244     R.ch = R.R * (9 * 1.05526) / (5 * 0.45359) //kJ/(kgK)
245     phiref0 = (phi_air_ch(Tref) + f * phi_prod_ch(Tref)) / (1 + f)
246
247 Else
248     R.ch = R.air * (1 + f * R0) / (1 + f)
249     phiref0 = (phi_air_ch(Tref) + f * ((Cp_air_ch(Tref) + Cp_air_ch(0))

```

```

/ 2) * (J0 * Math.Log(Tref) + J1 * Tref + J2 / (2 * Tref ^ 2))) / (1 + f)
//Kj/(kg*K)
End If

If propselect1 = True Then //En caso de que se haya
seleccionado el estado 1

Select Case ComboBoxprop1.Text // en funcion de variable
seleccionada

Case "Entalpia (h)"
h1 = val1 //kJ/kg

If method = True Then
T1 = CalcularT_h_met1(h1)
Cp1 = (Cp_air_ch(T1) + f * Cp_prod_ch(T1)) / (1 + f) //
kJ/(kgK)
phil = (phi_air_ch(T1) + f * phi_prod_ch(T1)) / (1 + f)
//kJ/(kgK)

Else
T1 = CalcularT_h_met2(h1)
Cp1 = Cp_air_ch(T1) * (1 + f * (J0 + J1 * T1 - J2 / T1 ^
2)) / (1 + f) // T en kelvin
phil = (phi_air_ch(T1) + f * ((Cp_air_ch(T1) + Cp_air_ch
(0)) / 2) * (J0 * Math.Log(T1) + J1 * T1 + J2 / (2 * T1 ^ 2))) / (1 + f) //Kj
/(kgK)

End If

Cv1 = Cp1 - R_ch
gamma1 = Cp1 / Cv1
v1 = (gamma1 * R_ch * 1000 * T1) ^ (0.5)
Pr1 = Math.Exp((phil - phiref0) / R_ch)

Case "Calor especifico (Cp)"
Cp1 = val1 //kJ/kgK

If method = True Then

T1 = CalcularT_Cp_met1(Cp1)
h1 = (h_air_ch(T1) + f * h_prod_ch(T1)) / (1 + f) //
kJ/kg
phil = (phi_air_ch(T1) + f * phi_prod_ch(T1)) / (1 + f)
//kJ/(kgK)

Else

T1 = CalcularT_Cp_met1(Cp1)
h1 = (h_air_ch(T1) + f * ((Cp_air_ch(T1) + Cp_air_ch(0))
/ 2) * (J0 * T1 + J1 * T1 ^ 2 / 2 + J2 / T1)) / (1 + f)
phil = (phi_air_ch(T1) + f * ((Cp_air_ch(T1) + Cp_air_ch
(0)) / 2) * (J0 * Math.Log(T1) + J1 * T1 + J2 / (2 * T1 ^ 2))) / (1 + f) //Kj
/(kg*K)

```

```

295         End If
296         Cv1 = Cp1 - R_ch
297         gamma1 = Cp1 / Cv1
298         v1 = (gamma1 * R_ch * 1000 * T1) ^ (0.5)
299         Pr1 = Math.Exp((phi1 - phiref0) / R_ch)
300
301
302     Case "Entropia especifica (phi)"
303         phi1 = val1 //kJ/KgK
304         If method = True Then
305
306             T1 = CalcularT_phi_met1(phi1)
307             Cp1 = (Cp_air_ch(T1) + f * Cp_prod_ch(T1)) / (1 + f) //
kJ/(kg*K)
308             h1 = (h_air_ch(T1) + f * h_prod_ch(T1)) / (1 + f) //
kJ/kg
309
310         Else
311
312             T1 = CalcularT_phi_met2(phi1)
313             Cp1 = Cp_air_ch(T1) * (1 + f * (J0 + J1 * T1 - J2 / T1 ^
2)) / (1 + f) // T en kelvin
314             h1 = (h_air_ch(T1) + f * ((Cp_air_ch(T1) + Cp_air_ch(0))
/ 2) * (J0 * T1 + J1 * T1 ^ 2 / 2 + J2 / T1)) / (1 + f) // kJ/kg
315
316         End If
317         Cv1 = Cp1 - R_ch
318         gamma1 = Cp1 / Cv1
319         v1 = (gamma1 * R_ch * 1000 * T1) ^ (0.5)
320         Pr1 = Math.Exp((phi1 - phiref0) / R_ch)
321
322
323
324     Case "Temperatura (T)"
325         T1 = val1
326
327         If unidadT = RadioButtonTC.Text Then
328             T1 = T1 + 273
329         End If
330
331
332         If method = True Then
333             Cp1 = (Cp_air_ch(T1) + f * Cp_prod_ch(T1)) / (1 + f) //
kJ/(kg*K)
334             h1 = (h_air_ch(T1) + f * h_prod_ch(T1)) / (1 + f) //
kJ/kg
335             phi1 = (phi_air_ch(T1) + f * phi_prod_ch(T1)) / (1 + f)
//kJ/(kg*K)
336         Else
337             Cp1 = Cp_air_ch(T1) * (1 + f * (J0 + J1 * T1 - J2 / T1 ^
2)) / (1 + f) // T en kelvin
338             h1 = (h_air_ch(T1) + f * ((Cp_air_ch(T1) + Cp_air_ch(0))
/ 2) * (J0 * T1 + J1 * T1 ^ 2 / 2 + J2 / T1)) / (1 + f) //kJ/kg
339             phi1 = (phi_air_ch(T1) + f * ((Cp_air_ch(T1) + Cp_air_ch
(0)) / 2) * (J0 * Math.Log(T1) + J1 * T1 + J2 / (2 * T1 ^ 2)))) / (1 + f) //Kj
/(kg*K)
340         End If
341

```

```

343         Cv1 = Cp1 - R_ch
344         gamma1 = Cp1 / Cv1
345         v1 = (gamma1 * R_ch * 1000 * T1) ^ (0.5)
346         Pr1 = Math.Exp((phi1 - phiref0) / R_ch)
347
348
349         Case "Presion relativa (Pr)"
350             Pr1 = val1
351             phi1 = R_ch * Math.Log(Pr1) + phiref0
352
353
354             If method = True Then
355
356                 T1 = CalcularT_phi_met1(phi1)
357                 Cp1 = (Cp_air_ch(T1) + f * Cp_prod_ch(T1)) / (1 + f) //
358                 kJ/(kg*K)
359                 h1 = (h_air_ch(T1) + f * h_prod_ch(T1)) / (1 + f) //
360                 kJ/kg
361
362             Else
363
364                 T1 = CalcularT_phi_met2(phi1)
365                 Cp1 = Cp_air_ch(T1) * (1 + f * (J0 + J1 * T1 - J2 / T1 ^
366                 2)) / (1 + f) // T en kelvin
367                 h1 = (h_air_ch(T1) + f * ((Cp_air_ch(T1) + Cp_air_ch(0))
368                 / 2) * (J0 * T1 + J1 * T1 ^ 2 / 2 + J2 / T1)) / (1 + f) // kJ/kg
369             End If
370             //Calculo de Cv, relacion de calores especificos y velocidad del
371             sonido en el gas
372             Cv1 = Cp1 - R_ch
373             gamma1 = Cp1 / Cv1
374             v1 = (gamma1 * R_ch * 1000 * T1) ^ (0.5)
375
376         End Select
377         //Muestra de resultados en la pantalla
378         LabelT1.Text = " T = " & Math.Round(T1, 2) & " [Kelvin]"
379         LabelCp1.Text = " Cp = " & Math.Round(Cp1, 4) & " [kJ/kgK]"
380         Labelh1.Text = " h = " & Math.Round(h1, 2) & " [kJ/kg]"
381         Labelphi1.Text = " Phi = " & Math.Round(phi1, 3) & " [kJ/kgK]"
382         LabelPr1.Text = " Pr = " & Math.Round(Pr1, 2)
383         Labelv1.Text = " a = " & Math.Round(v1, 2) & " [m/s]"
384     End If
385
386     If propselect2 = True Then
387         //seleccion en funcion de variable
388
389         Select Case ComboBoxprop2.Text
390             Case "Entalpia (h)"
391                 h2 = val2 //kJ/kg
392
393             If method = True Then
394                 T2 = CalcularT_h_met1(h2)
395                 Cp2 = (Cp_air_ch(T2) + f * Cp_prod_ch(T2)) / (1 + f) //
396                 kJ/(kg*K)
397                 phi2 = (phi_air_ch(T2) + f * phi_prod_ch(T2)) / (1 + f)

```

```

//kJ/(kg*K)

395         Else
397             T2 = CalcularT_h_met2(h2)
397             Cp2 = Cp_air_ch(T2) * (1 + f * (J0 + J1 * T2 - J2 / T2 ^
2)) / (1 + f) // T en kelvin
399             phi2 = (phi_air_ch(T2) + f * ((Cp_air_ch(T2) + Cp_air_ch
(0)) / 2) * (J0 * Math.Log(T2) + J1 * T2 + J2 / (2 * T2 ^ 2))) / (1 + f) //Kj
/(kg*K)

401         End If

403         Cv2 = Cp2 - R_ch
403         gamma2 = Cp2 / Cv2
405         v2 = (gamma2 * R_ch * 1000 * T2) ^ (0.5)
405         Pr2 = Math.Exp((phi2 - phiref0) / R_ch)
407         P2 = P * (Pr2 / Pr1)

409         Case "Calor especifico (Cp)"
409             Cp2 = val2 //kJ/Kgk

411             If method = True Then

413                 T2 = CalcularT_Cp_met1(Cp2)
413                 h2 = (h_air_ch(T2) + f * h_prod_ch(T2)) / (1 + f) //
kJ/kg
415                 phi2 = (phi_air_ch(T2) + f * phi_prod_ch(T2)) / (1 + f)
//kJ/(kg*K)

417             Else

419                 T2 = CalcularT_Cp_met2(Cp2)
419                 h2 = (h_air_ch(T2) + f * ((Cp_air_ch(T2) + Cp_air_ch(0))
/ 2) * (J0 * T2 + J1 * T2 ^ 2 / 2 + J2 / T2)) / (1 + f)
421                 phi2 = (phi_air_ch(T2) + f * ((Cp_air_ch(T2) + Cp_air_ch
(0)) / 2) * (J0 * Math.Log(T2) + J1 * T2 + J2 / (2 * T2 ^ 2))) / (1 + f) //Kj
/(kg*K)

423             End If
423             Cv2 = Cp2 - R_ch
425             gamma2 = Cp2 / Cv2
425             v2 = (gamma2 * R_ch * 1000 * T2) ^ (0.5)
427             Pr2 = Math.Exp((phi2 - phiref0) / R_ch)
429             P2 = P * (Pr2 / Pr1)

431         Case "Entropia especifica (phi)"
431             phi2 = val2 //kJ/Kgk

433             If method = True Then

435                 T2 = CalcularT_phi_met1(phi2)
437                 Cp2 = (Cp_air_ch(T2) + f * Cp_prod_ch(T2)) / (1 + f) //
kJ/(kg*K)
437                 h2 = (h_air_ch(T2) + f * h_prod_ch(T2)) / (1 + f) //
kJ/kg
439             Else

```



```

441         T2 = CalcularT_phi_met2(phi2)
443         Cp2 = Cp_air_ch(T2) * (1 + f * (J0 + J1 * T2 - J2 / T2 ^
2)) / (1 + f) // T en kelvin
         h2 = (h_air_ch(T2) + f * ((Cp_air_ch(T2) + Cp_air_ch(0))
/ 2) * (J0 * T2 + J1 * T2 ^ 2 / 2 + J2 / T2)) / (1 + f) // kj/kg
445
         End If
447         Cv2 = Cp2 - R_ch
         gamma2 = Cp2 / Cv2
449         v2 = (gamma2 * R_ch * 1000 * T2) ^ (0.5)
         Pr2 = Math.Exp((phi2 - phiref0) / R_ch)
451         P2 = P * (Pr2 / Pr1)

453     Case "Temperatura (T)"
455         T2 = val2
         If unidadT2 = RadioButtonTC2.Text Then
457             T2 = T2 + 273
         End If

         If method = True Then
461             Cp2 = (Cp_air_ch(T2) + f * Cp_prod_ch(T2)) / (1 + f) //
kJ/(kg*K)
             h2 = (h_air_ch(T2) + f * h_prod_ch(T2)) / (1 + f) //
kJ/kg
463             phi2 = (phi_air_ch(T2) + f * phi_prod_ch(T2)) / (1 + f)
//kJ/(kg*K)
         Else
465             Cp2 = Cp_air_ch(T2) * (1 + f * (J0 + J1 * T2 - J2 / T2 ^
2)) / (1 + f) // T en kelvin
             h2 = (h_air_ch(T2) + f * ((Cp_air_ch(T2) + Cp_air_ch(0))
/ 2) * (J0 * T2 + J1 * T2 ^ 2 / 2 + J2 / T2)) / (1 + f) // kj/kg
467             phi2 = (phi_air_ch(T2) + f * ((Cp_air_ch(T2) + Cp_air_ch
(0)) / 2) * (J0 * Math.Log(T2) + J1 * T2 + J2 / (2 * T2 ^ 2))) / (1 + f) //Kj
/(kg*K)
         End If

469         Cv2 = Cp2 - R_ch
         gamma2 = Cp2 / Cv2
471         v2 = (gamma2 * R_ch * 1000 * T2) ^ (0.5)
         Pr2 = Math.Exp((phi2 - phiref0) / R_ch)
473         P2 = P * (Pr2 / Pr1)

475

477     Case "Presion relativa (Pr)"
479         Pr2 = val2
         phi2 = R_ch * Math.Log(Pr2) + phiref0

         If method = True Then

481             T2 = CalcularT_phi_met1(phi2)
483             Cp2 = (Cp_air_ch(T2) + f * Cp_prod_ch(T2)) / (1 + f) //
kJ/(kg*K)
             h2 = (h_air_ch(T2) + f * h_prod_ch(T2)) / (1 + f) //
kJ/kg
487

```

```

Else
    T2 = CalcularT_phi_met2(phi2)
    Cp2 = Cp_air_ch(T2) * (1 + f * (J0 + J1 * T2 - J2 / T2 ^
2)) / (1 + f) // T en kelvin
    h2 = (h_air_ch(T2) + f * ((Cp_air_ch(T2) + Cp_air_ch(0))
/ 2) * (J0 * T2 + J1 * T2 ^ 2 / 2 + J2 / T2)) / (1 + f) // kJ/kg
End If

Cv2 = Cp2 - R_ch
gamma2 = Cp2 / Cv2
v2 = (gamma2 * R_ch * 1000 * T2) ^ (0.5)
P2 = P * (Pr2 / Pr1)

Case "Presion (P)"
    P2 = val2
    Pr2 = Pr1 * (P2 / P)
    phi2 = R_ch * Math.Log(Pr2) + phiref0

    If method = True Then

        T2 = CalcularT_phi_met1(phi2)
        Cp2 = (Cp_air_ch(T2) + f * Cp_prod_ch(T2)) / (1 + f) //
kJ/(kg*K)
        h2 = (h_air_ch(T2) + f * h_prod_ch(T2)) / (1 + f) //
kJ/kg
    Else
        T2 = CalcularT_phi_met2(phi2)
        Cp2 = Cp_air_ch(T2) * (1 + f * (J0 + J1 * T2 - J2 / T2 ^
2)) / (1 + f) // T en kelvin
        h2 = (h_air_ch(T2) + f * ((Cp_air_ch(T2) + Cp_air_ch(0))
/ 2) * (J0 * T2 + J1 * T2 ^ 2 / 2 + J2 / T2)) / (1 + f) //kJ/kg
    End If
    Cv2 = Cp2 - R_ch //Calculo de Cv, relacion de
calores especificos y velocidad del sonido en el gas
    gamma2 = Cp2 / Cv2
    v2 = (gamma2 * R_ch * 1000 * T2) ^ (0.5)

End Select
//Muestra resultados en pantalla
Labelphi2.Text = "Phi = " & Math.Round(phi2, 3) & " [kJ/kgK]"
Labelv2.Text = " a = " & Math.Round(v2, 2) & " [m/s]"
LabelCp2.Text = " Cp = " & Math.Round(Cp2, 3) & " [kJ/kgK]"
Labelh2.Text = " h = " & Math.Round(h2, 2) & " [kJ/kg]"
LabelPr2.Text = " Pr = " & Math.Round(Pr2, 2)
LabelP2.Text = " P = " & Math.Round(P2, 2)
LabelT2.Text = " T = " & Math.Round(T2, 2) & " [Kelvin]"

End If

End Sub
//Seleccion de las unidades de la temperatura en los estados 1 y 2.

Private Sub RadiobuttonTK.CheckedChanged(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadiobuttonTK.CheckedChanged
    If RadiobuttonTK.Enabled = True Then

```

```

539         Labelprop1.Text = "[Kelvin]"
        unidadT = RadiobuttonTK.Text
541     End If
End Sub

543 Private Sub RadiobuttonTK2_CheckedChanged(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadiobuttonTK2.CheckedChanged
    If RadiobuttonTK2.Enabled = True Then
545         Labelprop2.Text = "[Kelvin]"
        unidadT2 = RadiobuttonTK2.Text
547     End If
End Sub

549 Private Sub RadiobuttonTC_CheckedChanged(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadiobuttonTC.CheckedChanged
551     If RadiobuttonTC.Enabled = True Then
        Labelprop1.Text = "[grados centigrados]"
553         unidadT = RadiobuttonTC.Text
    End If
555 End Sub

557 Private Sub RadiobuttonTC2_CheckedChanged(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadiobuttonTC2.CheckedChanged
    If RadiobuttonTC2.Enabled = True Then
559         Labelprop2.Text = "[grados centigrados]"
        unidadT2 = RadiobuttonTC2.Text
561     End If
End Sub

563
565 //En caso de seleccionar una variable del estado 2, activa el texto de las
unidades en funcion de cada variable
567
569 Private Sub ComboBoxprop2_TextChanged(ByVal sender As Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles ComboBoxprop2.TextChanged
571
    LabelP.Visible = True
    TextBoxP.Visible = True
    propselect2 = True
573
    Select Case ComboBoxprop2.Text
575
        Case "Presion (P)"
577             Labelprop2.Text = ""
            LabelP.Text = "Presion: "
579             RadiobuttonTK2.Visible = False
            RadiobuttonTC2.Visible = False
581
        Case "Presion relativa (Pr)"
583             Labelprop2.Text = ""
            LabelP.Text = "Presion (opcional): "
585             RadiobuttonTK2.Visible = False
            RadiobuttonTC2.Visible = False
587
        Case "Entropia especifica (phi)"
589
            Labelprop2.Text = "[kJ/(kgK)]"

```

```

591         LabelP.Text = "Presion (opcional): "
592         RadioButtonTK2.Visible = False
593         RadioButtonTC2.Visible = False
594
595     Case "Entalpia (h)"
596         Labelprop2.Text = "[kJ/Kg]"
597         LabelP.Text = "Presion (opcional): "
598         RadioButtonTK2.Visible = False
599         RadioButtonTC2.Visible = False
600
601     Case "Temperatura (T)"
602
603         Labelprop2.Text = "Kelvin"
604         LabelP.Text = "Presion (opcional): "
605         RadioButtonTK2.Visible = True
606         RadioButtonTC2.Visible = True
607
608     Case "Calor especifico (Cp)"
609         Labelprop2.Text = "[kJ/(kgK)]"
610         LabelP.Text = "Presion (opcional): "
611         RadioButtonTK2.Visible = False
612         RadioButtonTC2.Visible = False
613
614     End Select
615 End Sub
616
617 //En caso de seleccionar una variable del estado 1, activa el texto de las
618 unidades en funcion de cada variable
619
620 Private Sub ComboBoxprop1_TextChanged(ByVal sender As Object, ByVal e As
621 System.EventArgs) Handles ComboBoxprop1.TextChanged
622
623     propselect1 = True
624
625     Select Case ComboBoxprop1.Text
626
627         Case "Presion relativa (Pr)"
628             Labelprop1.Text = ""
629             RadiobuttonTK.Visible = False
630             RadioButtonTC.Visible = False
631
632         Case "Entropia especifica (phi)"
633             Labelprop1.Text = "[kJ/(kgK)]"
634             RadiobuttonTK.Visible = False
635             RadioButtonTC.Visible = False
636
637         Case "Entalpia (h)"
638             Labelprop1.Text = "[kJ/Kg]"
639             RadiobuttonTK.Visible = False
640             RadioButtonTC.Visible = False
641
642         Case "Temperatura (T)"
643             Labelprop1.Text = "[kelvin]"
644             RadiobuttonTK.Visible = True
645             RadioButtonTC.Visible = True
646
647         Case "Calor especifico (Cp)"
648             Labelprop1.Text = "[kJ/(kgK)]"

```

```

647         RadiobuttonTK.Visible = False
        RadioButtonTC.Visible = False
649
        End Select
651     End Sub

653     //En caso de seleccionar un combustible, especifica el metodo y asigna las
    constantes necesarias.

655     Private Sub ComboBoxcombustible_TextChanged(ByVal sender As Object, ByVal e
    As System.EventArgs) Handles ComboBoxcombustible.TextChanged

657         Select Case ComboBoxcombustible.Text
            Case "(CH2)n"
659             f_est = f_ch2
            method = True

661
            Case "Metano"
663             R0 = R0_meth
            J0 = J0_meth
665             J1 = J1_meth
            J2 = J2_meth
667             f_est = f_meth
            method = False

669             Case "Propano"
            R0 = R0_prop
671             J0 = J0_prop
            J1 = J1_prop
673             J2 = J2_prop
            f_est = f_prop
675             method = False

            Case "Octano"
677             R0 = R0_oct
            J0 = J0_oct
679             J1 = J1_oct
            J2 = J2_oct
681             f_est = f_oct
            method = False

683             Case "Alcohol metilico"
            R0 = R0_methyl
685             J0 = J0_methyl
            J1 = J1_methyl
687             J2 = J2_methyl
            f_est = f_methyl
689             method = False

            Case "Alcohol etilico"
691             R0 = R0_ethyl
            J0 = J0_ethyl
693             J1 = J1_ethyl
            J2 = J2_ethyl
695             f_est = f_ethyl
            method = False

697             Case "Gasolina"
            R0 = R0_gaso
699             J0 = J0_gaso
            J1 = J1_gaso
701             J2 = J2_gaso
            f_est = f_gaso

```

```

703         method = False
704     Case "Diesel"
705         R0 = R0_die
706         J0 = J0_die
707         J1 = J1_die
708         J2 = J2_die
709         f_est = f_die
710         method = False
711     Case "Queroseno"
712         R0 = R0_kero
713         J0 = J0_kero
714         J1 = J1_kero
715         J2 = J2_kero
716         f_est = f_kero
717         method = False
718     Case "CO"
719         R0 = R0_CO
720         J0 = J0_CO
721         J1 = J1_CO
722         J2 = J2_CO
723         f_est = f_CO
724         method = False
725     Case "Gas natural"
726         R0 = R0_natu
727         J0 = J0_natu
728         J1 = J1_natu
729         J2 = J2_natu
730         f_est = f_natu
731         method = False
732     Case "Carbon puro"
733         R0 = R0_C
734         J0 = J0_C
735         J1 = J1_C
736         J2 = J2_C
737         f_est = f_C
738         method = False
739     Case "Hidrogeno"
740         R0 = R0_H
741         J0 = J0_H
742         J1 = J1_H
743         J2 = J2_H
744         f_est = f_H
745         method = False
746
747     End Select
748
749
750 End Sub
751
752 //En caso de seleccionar el dosado o el dosado relativo
753
754 Private Sub CheckBoxfrel_Click(ByVal sender As Object, ByVal e As System.
EventArgs) Handles CheckBoxfrel.Click
755     If CheckBoxfrel.Checked = True Then
756         unidadfrel = True
757         Labelf.Text = "Dosado relativo:"
758     Else

```

B. Anexo B

```
761         unidadfrel = False
762         Labelf.Text = "Dosado:"
763     End If
764 End Sub
765
End Class
```